

## Визуализация нагретой разрядом области в канале на основе тепловизионной регистрации

И.А. Знаменская<sup>1</sup>, Е.А. Карнозова<sup>2</sup>, Т.А. Кули-Заде<sup>3</sup>

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-6362-9496, [znamen@phys.msu.ru](mailto:znamen@phys.msu.ru)

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-9611-443X, [karnozova.ea16@physics.msu.ru](mailto:karnozova.ea16@physics.msu.ru)

<sup>3</sup> ORCID: 0000-0003-0249-6292, [tahir@physics.msu.ru](mailto:tahir@physics.msu.ru)

### Аннотация

В работе представлены результаты панорамной визуализации нестационарных тепловых полей, полученные на стенде УТРО-3 (Ударная Труба-Разряд-Оптика) физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова на основе инфракрасной термографии. Основной целью работы являлось исследование нагрева и остывания участков профилированного прямоугольного канала при воздействии импульсных поверхностных сильноточных разрядов, скользящих по поверхности диэлектрика с учетом особенностей сверхзвукового течения в канале с препятствием. Исследовался импульсный поверхностный разряд, инициированный в канале 24x48 мм<sup>2</sup> в изначально покоящейся газе и в высокоскоростном потоке. При инициировании в потоке (время задержки после прохода ударной волны – до 0,4 мс) плазма разряда локализуется преимущественно в подветренной области за обратным уступом (прямоугольной вставкой). Разряд создает импульсный (субмикросекундный) энергоклад протяженностью 30 мм в зоне своей локализации. В результате, происходит кратковременный нагрев участка прилегающей к ней стенки канала. С помощью термографической съёмки через кварцевые окна камеры, прозрачные для ИК излучения, зафиксировано, что плазма импульсного разряда заметно нагревает поверхность плоской стенки канала. По полученным данным панорамной визуализации с экспозицией от 200 мкс была исследована эволюция остывания стенок канала как в неподвижном воздухе, так и при различных скоростях набегающего потока – в подветренной области за диэлектрической вставкой.

**Ключевые слова:** инфракрасная термография, панорамная визуализация, эволюция тепловых полей, высокоскоростная съёмка, наносекундный разряд, высокоскоростные течения, ударные волны.

## 1. Введение

Развитие высокоскоростной термографической техники привело к возможности визуализации и регистрации достаточно быстро изменяющихся тепловых полей, создаваемых нестационарными потоками газа, в частности, – характеристик области пограничного слоя газодинамического течения.

В задачах управления потоками с помощью плазмы импульсных разрядов наибольший интерес представляет быстрый (на субмикросекундном масштабе времен) нагрев газа. Тепло, выделяемое при инициировании плазмы наносекундных поверхностных разрядов, распределяется в основном по двум каналам: быстрый нагрев воздуха вблизи стенки и нагрев материала диэлектрического слоя [1 – 6]. Позже происходит процесс конвективного теплообмена между материалом диэлектрического слоя и нагретым воздухом. Для исследования температурных полей при инициировании наносекундного диэлектрического барьерного разряда (NS-DBD) [4] было проведено сравнение результатов, полученных на основе ИК-термографии и

методом оптической эмиссионной спектроскопии. Анализ результатов показал, что вращательная температура плазмы, полученная с помощью оптической эмиссионной спектроскопии, оказалась близка к температуре, измеренной с помощью ИК-термографии, что означает, что температура газа в использованном разряде может быть приблизительно представлена вращательной температурой.

На основе сочетания метода инфракрасной термографии и высокоскоростной шпирен регистрации были проведены [5] исследования влияния ряда параметров на разрядные и тепловые характеристики NS-DBD разряда. С помощью тепловизионной съемки были зарегистрированы распределения температуры поверхности электродов при изменении поля течения в течение 120 с (время работы плазменного актуатора – индуцируемого NS-DBD). При этом тепловизор находился близко к участку поверхности, где инициировался разряд, поэтому ослаблением излучаемой мощности, вызванным поглощением и рассеянием различных компонентов в воздухе, пренебрегалось. Температура поверхности внешнего медного электрода не анализировалась из-за его относительно более низкой поверхностной излучательной способности [6, 7].

Несмотря на достаточно большое количество работ по исследованию влияния актуаторов на поток, тепловые поля в высокоскоростных нестационарных течениях рассматриваются крайне редко [3, 8]. В большинстве исследований метод инфракрасной термографии применялся, в основном, к исследованию теплового воздействия разряда в высокочастотном режиме при его инициировании в дозвуковом потоке или в стационарных течениях газа в аэродинамической трубе.

## **2. Установка и панорамная регистрация.**

В канале камеры низкого давления однодиафрагменной ударной трубы прямоугольного сечения  $24 \times 48 \text{ мм}^2$  [9] была встроена специальная разрядная секция (рис. 1) с прозрачными боковыми стенками, выполненными из кварцевого стекла (оптические окна) толщиной 16 мм. Через боковые стенки разрядной секции методами высокоскоростной регистрации (теневая съемка, регистрация оптического свечения, тепловизионная съемка) исследовалось воздействие на высокоскоростной поток распределенного поверхностного разряда, скользящего по поверхности диэлектрика в пространстве между медными плазменными электродами, установленными заподлицо на диэлектрических поверхностях верхней и нижней стенки [10]. Поверхностный разряд одновременно инициировался на верхней и нижней стенках разрядной секции и представлял собой два тонких плазменных слоя (плазменные листы). Площадь каждого плазменного листа составляла  $100 \times 30 \text{ мм}^2$ . Оба разряда имели многоканальную структуру: каждый разряд представлял собой набор параллельных плазменных микроканалов длиной 30 мм, распределенных по поверхности диэлектрика длиной 100 мм и отстоящих на 9 мм (ширина электрода) от каждой из боковых стенок.

На нижнюю стенку канала между двумя оптическими окнами на расстоянии 20 мм от одного края нижнего плазменного электрода была установлена диэлектрическая вставка, изготовленная из капролона, размером  $48 \times 6 \times 2 \text{ мм}^3$ . Наличие уступа создавало 6-мм зазор в нижнем плазменном слое, изменявший локальное распределение электрического поля разряда, тем самым повышая локальный импульсный энерговыход – вблизи уступа значение быстро термализованной энергии разряда увеличивается в 5 – 7 раз по сравнению со значениями средней концентрации термализованной энергии в верхнем плазменном листе [10].

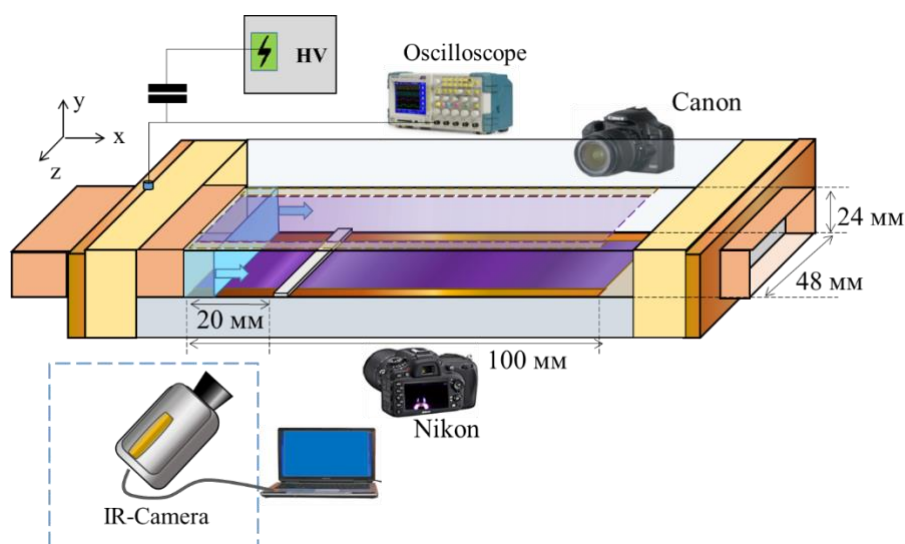


Рисунок 1. Схема рабочей секции.

Результаты, получаемые методами высокоскоростной регистрации, использовались для определения количественных данных о зависимости максимального времени излучения ярких каналов в оптическом и инфракрасном диапазоне от давления.

Данные по эволюции свечения плазмы поверхностного разряда, инициированного в изначально неподвижном воздухе, регистрировались в оптическом диапазоне (Камера Бифо КО11 – девятикадровая съемка, экспозиция 100 нс, время между кадрами 100 нс) и проводилась панорамная визуализация тепловых полей (термографическая съемка в диапазоне пропускания кварцевых окон разрядной секции) после разряда. Снимки оптического свечения, зарегистрированного высокоскоростной 9-кадровой камерой сравнивались с интегральным изображением свечения разряда. Интегральная съемка свечения плазмы разряда, получаемая с двух ракурсов на цифровые фотоаппараты Nikon D50 и Canon EOS 500D, дает представление о расположении областей повышенной интенсивности оптического излучения (как в области стягивания плазмы к диэлектрической вставке, так и отдельных сильных каналов на верхней стенке).

Панорамная визуализация теплового излучения от диэлектрической поверхности внутри разрядной секции проводилась через боковые прозрачные окна с помощью инфракрасной (ИК-) камеры (тепловизора) Telops FAST M200 со спектральным диапазоном 1,5 – 5,1 мкм. Частота тепловизионной регистрации ( $F$ ) и экспозиция одного кадра ( $t_e$ ) варьировались в зависимости от заданных размеров регистрируемой области и составляли:  $F = 500 - 1500$  кадр/с и  $t_e = 0,2 - 1,0$  мс, соответственно.

### **3. Визуализация нестационарных полей теплового излучения при инициировании импульсных поверхностных разрядов в покоящемся газе.**

С целью анализа времени теплового воздействия разряда на поверхности стенок канала была исследована динамика тепловых полей диэлектрических поверхностей, нагретых в результате инициирования плазмы разряда и проведено сравнение с временем оптического свечения (и временем ударно-волнового воздействия на среду) при различных значениях начального давления.

При инициировании разряда в покоящемся воздухе на нижней стенке результаты покадровой съемки оптического свечения плазмы разряда показывают, что в первые 50–100 нс оптическое излучение нижнего плазменного листа практически однородно, кроме непосредственно области препятствия длиной 6 мм. Длительность тока разряда регистрировалась по осциллограммам тока и составляла порядка 300–500 нс в случае инициирования разряда при начальном давлении  $P \sim 90-125$  торр. К этому времени на

покадровых снимках наблюдается эффект вытеснения поверхностного разряда в сторону диэлектрической вставки – усиление интенсивности свечения нижнего плазменного листа в области диэлектрической вставки. После завершения тока разряда (спустя 300 нс) данное усиленное оптическое свечение плазмы релаксирует за время порядка 0.7–1.9 микросекунды [11]. Оптическое излучение от верхнего плазменного листа, инициированного на верхней плоской стенке, остается достаточно однородным (набор параллельных плазменных микроканалов длиной 30 мм равномерно распределен по поверхности диэлектрика длиной 100 мм) и быстро релаксирует после завершения тока разряда.

Кварцевые окна пропускают значительную часть инфракрасного излучения тепловых полей, генерируемых внутри камеры за счет плазменных и ударно – волновых процессов. В случае наличия подобной частично прозрачной среды между исследуемым объектом и объективом ИК-камеры необходимо учитывать также все отражения и общее поглощение данной среды. При этом регистрируемое излучение изменяется в зависимости от длины волны, состояния поверхности окон, их температуры. Значение коэффициента излучения объекта также может изменяться в зависимости от угла, под которым виден излучающий объект. Эти ограничения не позволяют проводить достоверные количественные абсолютные измерения температуры нагретой области. Однако термографическая визуализация позволяет исследовать пространственно-временные характеристики тепловых полей и анализировать механизм теплообмена в соответствующих областях.

Для корректного пересчета регистрируемого излучения в значения радиационной температуры необходимо определять следующие параметры: коэффициент излучения объекта, эффективную температуру окружающих объектов, температуру атмосферы и расстояние между тепловизором и объектом (для расчета пропускания атмосферы) [12, 13].

С помощью ИК съёмки в разрядной камере зафиксировано, что индуцируемая плазма разряда заметно нагревает поверхности стенки канала в регистрируемой области. При этом области повышенного свечения в видимом диапазоне являются источниками более интенсивного локального нагрева. При инициировании плазменного листа в неподвижном воздухе на верхней стенке разрядной секции основным механизмом теплообмена, обеспечивающим нагрев стенки, является теплопроводность (нагрев стенки плазмой). Затем в отсутствии плазмы наблюдается остывание стенки посредством механизмов теплопроводности.

При инициировании поверхностного разряда на нижней стенке камеры локально происходит импульсный нагрев поверхности стенки и поверхностей выступа. За счет контакта с плазменным листом температура стенок канала и температура выступа повышается – как путем теплообмена с плазмой повышенной интенсивности (боковые поверхности выступа), так и за счет нагрева потоком за движущейся ударной волной от разряда.

Анализ экспериментальных данных и обработка термографических изображений проводилась в программе Reveal IR. Цветовая палитра выбиралась на панели инструментов программы. Безразмерная интенсивность на термограммах приведена в условных единицах.

На рисунке 2 (а) – (с) представлены тепловизионные изображения, полученные при покадровой визуализации теплового излучения ( $F = 1000$  кадр/с,  $t_e = 0,6$  мс) от диэлектрических поверхностей нижней стенки канала в области вставки. Поверхностный разряд инициировался в покоящемся воздухе с начальным давлением  $124 \pm 2$  торр. На кадрах (а) – (с) представлены результаты термографической визуализации после вычета фона и наложения фильтра для устранения пересветки. При этом интенсивность по полученным данным с первого кадра (рис. 2 (а)) исходно существенно превышала интенсивность, зарегистрированную на последующих кадрах тепловизионной съемки.

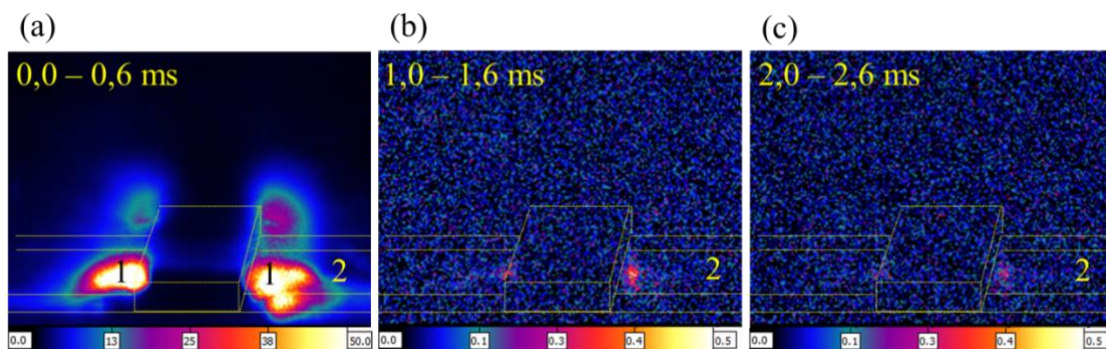


Рисунок 2. 1 – область нагрева, 2 – плазменный лист (регистрируемый участок межэлектродной области).

Анализ данных в широком диапазоне давлений воздуха и условий съемки продемонстрировал, что в результате самолокализации плазмы поверхностного разряда область уступа остается нагретой существенно дольше, чем плоская верхняя стенка канала, нагретая достаточно однородным поверхностным разрядом. Из-за существенной разницы характерных времен процессов, происходящих при инициировании наносекундного поверхностного разряда, первый кадр ИК-съемки часто включает в себя плазму разряда и последующее тепловое излучение от нагретой области (стенок канала), зафиксированное за время экспозиции. Обработка термограмм зарегистрированных тепловых потоков от стенок с усреднением по области повышенной интенсивности показала, что время послеразрядного остывания стенок в зонах вытеснения плазмы около прямоугольного диэлектрического профиля может достигать 20 мс; время остывания плоской стенки – до 3 – 4 мс. Первый кадр в серии изображений, включающий интервал свечения плазмы, не представлен на графике зависимости теплового излучения от времени при различных начальных давлениях (рис. 3). Частота съемки нижней стенки  $F = 629$  кадр/с, верхней –  $F = 1417$  кадр/с.

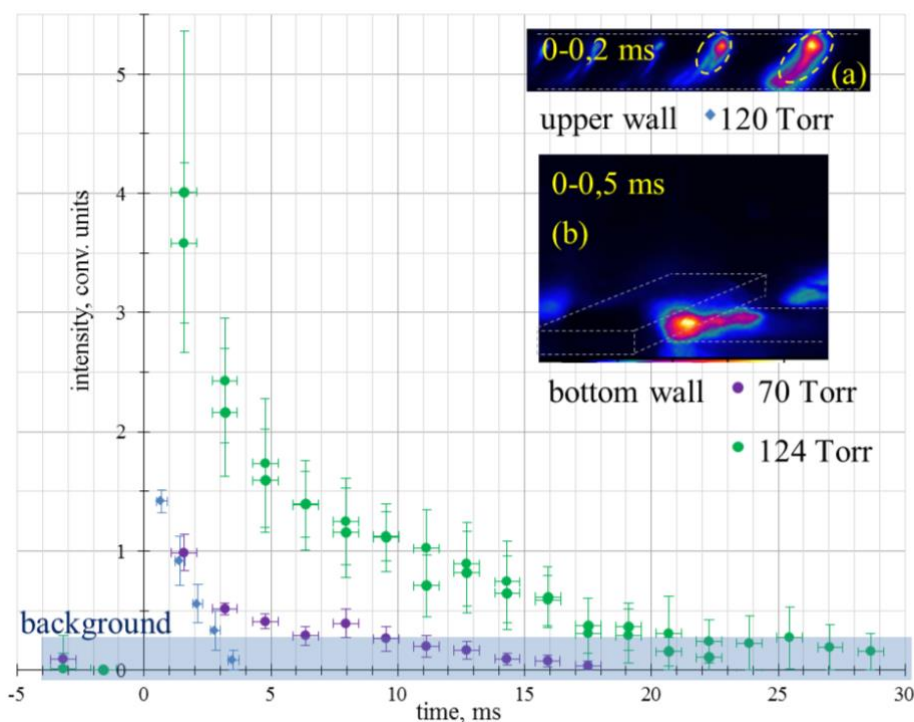


Рисунок 3. Локально нагретые области (а) участков верхней стенки канала (120 торр), (б) нижней стенки вблизи диэлектрической вставки (70 торр, 124 торр), интенсивность – в относительных единицах.

#### **4. Визуализация нестационарных полей теплового излучения при инициировании импульсных поверхностных разрядов в потоке.**

С помощью термографической съёмки были визуализированы тепловые поля, формирующиеся после дифракции набегающей плоской ударной волны (УВ) с числом Маха  $M_{УВ} = 2,8 - 3,2$  на прямоугольном уступе (прямая и обратная ступеньки). Изменение температуры газа на фронте ударной волны и в сверхзвуковом потоке за ней приводит к соответствующему изменению во времени тепловых потоков на обтекаемых поверхностях, в частности – в зоне торможения потока перед препятствием.

После прохождения ударной волной переднего уступа диэлектрической вставки в потоке за ней с различной задержкой  $t_p$  в канале разрядной секции инициировался импульсный поверхностный разряд. При инициировании импульсного поверхностного разряда в потоке на участке нижней стенки со вставкой плазма разряда распределяется в зонах пониженной плотности в виде короткоживущих сильноточных плазменных каналов. ИК излучение от областей, нагретых короткоживущим плазменным образованием, регистрировалось тепловизором. Для анализа длительности теплового эффекта были исследованы времена остывания областей, локально нагретых плазмой разряда, и проведено сравнение с данными, полученными при остывании участков канала в потоке без инициирования разряда, в дальнейшем использованных для формирования фона.

Время задержки между моментом прохождения плоской ударной волны наветренной стенки препятствия и моментом инициирования импульсного поверхностного разряда варьировалось в пределах  $t_p = 0,1 - 0,4$  мс. На данном временном интервале скорость потока достаточно высока:  $800 - 700$  м/с [9]. Выбор времени задержки позволяет инициировать разряд на разных стадиях развития потока. С течением времени скорость спутного потока за прошедшей ударной волной снижается, течение турбулизируется. Перераспределение разряда происходит в соответствии с изменением картины течения при обтекании потоком диэлектрического препятствия.

При малых задержках после прохода ударной волны передней кромки препятствия поверхности стенок канала обтекаются сверхзвуковым потоком. На рисунке 4 (а) представлен кадр высокоскоростной теневой съёмки через  $0,06$  мс после прохождения ударной волны передней кромки препятствия. В результате дифракции ударной волны на обратном уступе образуется вихрь (зона пониженной плотности за уступом см. численное моделирование соответствующего поля плотности рис. 4 (b)). Вихрь смещается вниз по потоку. Поверхностный разряд, инициируемый в данном режиме течения, визуализируется как короткоживущее плазменное образование, локализованное в зону вихря, представляющее собой поперечный плазменный канал длиной  $30$  мм, параллельный боковой стенке препятствия (рис. 4 (с) – (f)). Интегральные кадры свечения в видимом диапазоне плазмы разряда приведены на рис. 4 (d), (f),  $t_p = 0,06$  и  $0,34$  мс, соответственно. В результате, происходит кратковременный нагрев участка прилегающей к области плазмы стенки канала (рис. 4 (с), (е): кадры ИК-съёмки теплового поля после инициирования плазмы разряда, экспозиция  $t_e = 1,0$  мс).



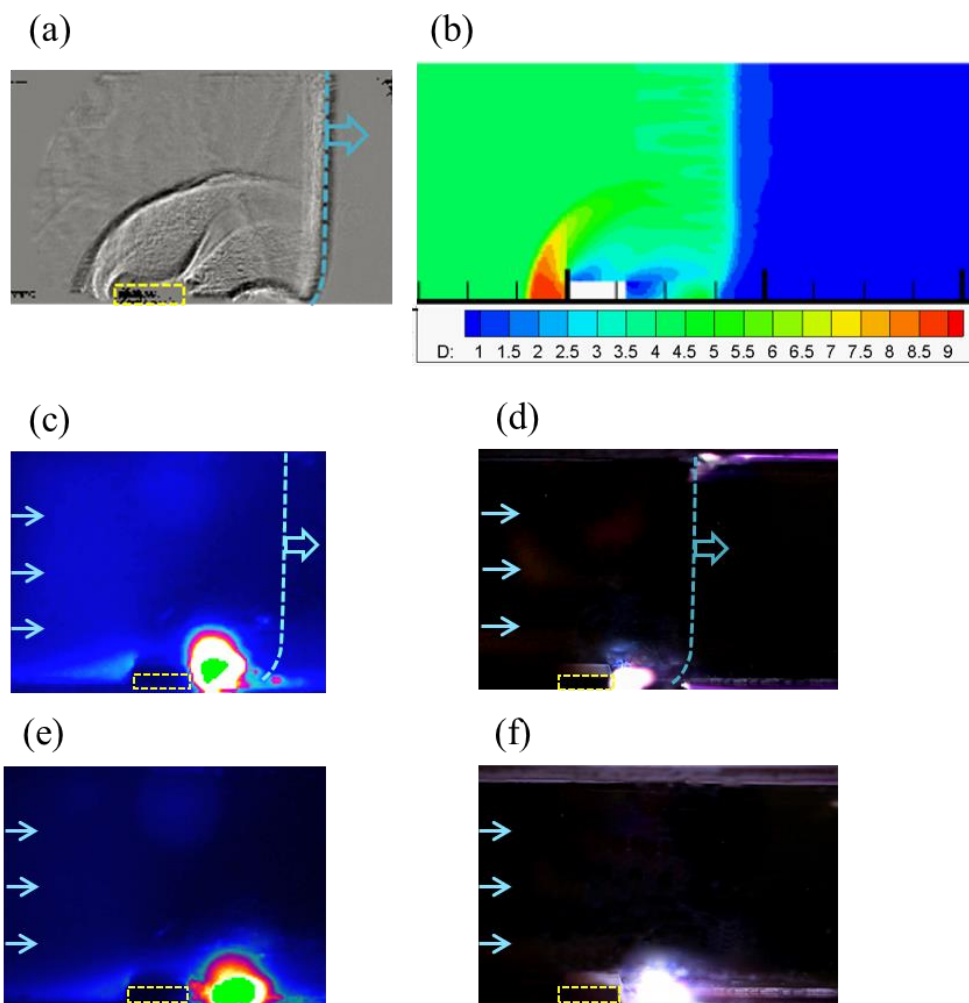


Рисунок 4. Визуализация тепловых полей: (а) кадр теневой съемки визуализирующий область течения за обратным уступом в сверхзвуковом потоке за плоской ударной волной; (б) численный расчет поля плотности; (с), (е) кадры тепловизионной съемки; (д), (ф) интегральные снимки свечения.

Тепловой эффект от инициирования поверхностного разряда существенен только в первые сотни микросекунд после инициирования плазмы разряда – импульсно нагретая область быстро сносится вниз по течению, тепло рассеивается.

Через 1 – 2 мс после релаксации плазмы разряда интенсивность теплового излучения от стенок канала в подветренной области, локально нагретых плазменным каналом, совпадает в пределах погрешности с фоном.

На рисунке 5 приведены последовательные изображения области потока после инициирования поверхностного разряда в потоке за плоской ударной волной ( $M_{UV} = 3,0 \pm 0,2$ ): через  $t_p = 0,34$  мс после прохода ударной волны. Частота 1000 к/с, экспозиция 0,6 мс, угол съемки  $5^\circ$ . Реальная интенсивность нагретой области торможения уменьшается со временем – от кадра (а) к кадру (д). Кадры (б) – (д) демонстрируют релаксацию интенсивности теплового поля участка канала в зоне торможения. Для снижения разницы в интенсивности излучения разряда и зоны торможения при визуализации на рисунке 5 (а) был применен другой фильтр.

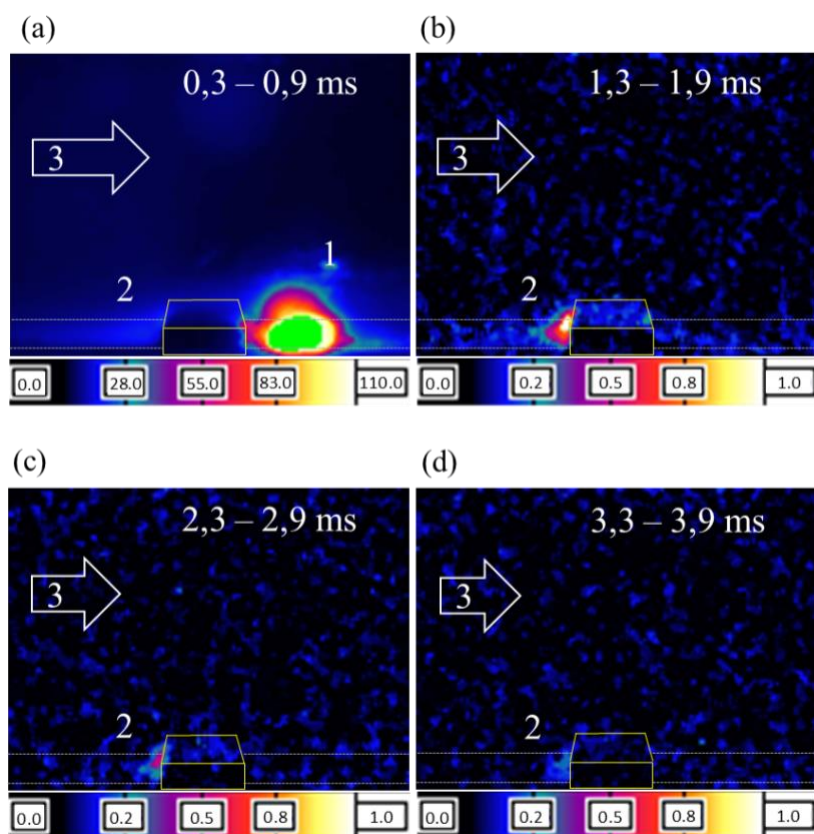


Рисунок 5. Кадры тепловизионной съемки: (1) – разряд, локализованный в вихревой области, (2) – область торможения потока, (3) – направление потока.

Термографическая съемка теплового излучения после инициирования разряда в потоке за плоской ударной волной ( $t_p = 0,2 - 0,4$  мс) проводилась с различных ракурсов. Визуальное сравнение первого кадра высокоскоростной съемки в ИК-диапазоне и интегрального оптического изображения дает представление о месте расположения участков, локально нагретых плазмой разряда, и областях, отражающих тепловые потоки, но не находящиеся в контакте с плазмой разряда. На рисунке 6 представлены результаты визуализации излучения плазмы разряда в ИК (рис. 6 (a)) и в видимом диапазоне (рис. 6 (b)), инициированного в потоке за плоской ударной волной ( $M_{ув} = 3,8$ ) через 0,2 мс после прохождения ударной волны передней кромки препятствия. При съемке тепловых потоков под углом (рис. 6 (a) – угол между нормалью к поверхности боковых стенок и объективом тепловизора равен  $35^\circ$ ) на первом кадре термографической съемки присутствуют различные артефакты, возникающие из-за отражения излучения от медных электродов, имеющих больший коэффициент отражения, чем диэлектрические поверхности, и боковых кварцевых стенок разрядной камеры. Подобные артефакты наблюдаются и на интегральных снимках оптического излучения плазмы разряда. Частота тепловизионной съемки составляла 589 кадр/с, экспозиция 1,0 мс. При таких параметрах экспозиции на термограмме наиболее четко регистрируются области, излучающие или отражающие тепловые потоки в течение длительного времени (до 1 мс). При этом на интегральных снимках оптического свечения, полученных с наносекундной экспозицией (300 – 500 нс), кроме основных областей (1 – 4 на рис. 6) присутствуют также области интенсивного излучения, такие как отдельные наносекундные микроканалы разряда и их отражения. Однако при термографической съемке ИК-излучение от соответствующих участков усредняется за более длительное время. В этом случае отдельные наносекундные тепловые потоки (и их отражения) могут иметь существенно меньшую (усредненную по времени наносекундной экспозиции) интенсивность по



сравнению с излучением от основной области локализации плазмы разряда или не быть отражены вовсе, приближаясь к значениям интенсивности фона.

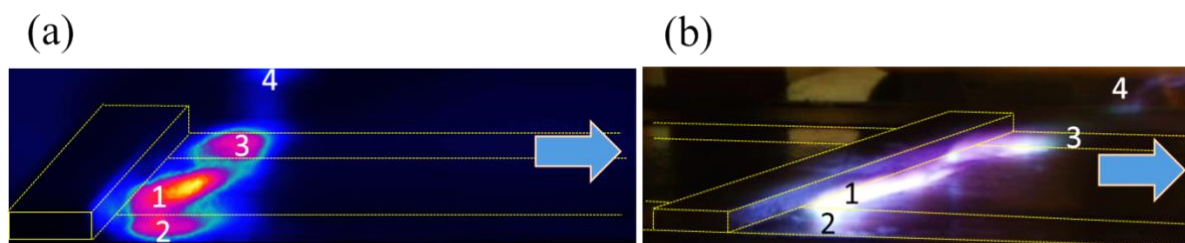


Рисунок 6. Визуализация (а) регистрируемого излучения в ИК-диапазоне и (б) интегральное изображение оптического свечения плазмы разряда: 1 – поверхностный разряд, локализованный в вихревой области, 2, 3 – отраженное поверхностью электродов излучение разряда, 4 – отражение излучения на боковой стенке.

## 5. Заключение

Проведено экспериментальное исследование нестационарных тепловых полей при нагреве и остывании участков профилированного прямоугольного канала после воздействия импульсных поверхностных разрядов с учетом особенностей сверхзвуковых течений.

На основе термографии с высоким временным и пространственным разрешением в диапазоне 1,5 – 5,1 мкм через окна рабочей камеры, пропускающие и видимое, и инфракрасное излучение, проведена панорамная визуализация и исследованы пространственно-временные характеристики нагрева и остывания стенок канала с препятствием после инициирования сильноточного поверхностного разряда 1) в покое газе, 2) в высокоскоростном потоке за плоской ударной волной с числом Маха 2.8 – 3.8.

Показано, что максимальное время теплового излучения нагретой разрядом области может достигать 20 мс в покое. Времена релаксации регистрируемого тепловизором излучения тепловых полей диэлектрических стенок канала, локально нагретых разрядом, длятся 1 – 2 мс в высокоскоростном потоке за ударной волной при локализации поверхностного разряда в подветренной области (на временных задержках электрического импульса от 0,01 до 0,4 мс после прохода ударной волны).

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 22-29-00652.

## Список источников

[1] Rodrigues F., Pascoa J., Trancossi M. Heat generation mechanisms of DBD plasma actuators // *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol 90, 2018, pp. 55–65.

[2] Jukes T. N., Choi K.-S., Johnson G. A., Scott S. J. Characterization of surface plasmainduced wall flows through velocity and temperature measurements // *AIAA Journal*, Vol. 44, № 4, 2006, pp. 764–771.

[3] Starikovskiy A. Yu., Alexandrov N. L. Управление газодинамическими потоками с помощью сверхбыстрого локального нагрева в сильнонеравновесной импульсной плазме [Gasdynamic flow control by superfast local heating in a strongly nonequilibrium pulse plasma] // *Fizika Plazmy*, Vol. 47, № 2, 2021, pp. 126–192. [in Russian]

[4] Zhou S., Su L., Shi T., Zheng T., Tong Y., Nie W., Che X., Zhao J. Experimental study on the diffusive flame stabilization mechanism of plasma injector driven by AC dielectric barrier discharge // *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 52, № 26, 2019, 265202.

[5] Zheng H., Liang H., Chen J., Zong H., Meng X., Xie L., Li Y. Experimental study on plasma actuation characteristics of nanosecond pulsed dielectric barrier discharge // *Plasma Science and Technology*, Vol. 24, № 1, 2022, 015505.

[6] Chen J., Liang H., Wu Y., Wei B., Zhao G., Tian M., Xie L. Experimental Study on Anti-Icing Performance of NS-DBD Plasma Actuator // *Applied Sciences*, Vol. 8, № 10, 2018, pp. 1889.

[7] Liu Y., Kolbakir C., Hu H., Starikovskiy A., Miles R.B. An experimental study on the thermal characteristics of NS-DBD plasma actuation and application for aircraft icing mitigation // *Plasma Science and Technology*, Vol. 28, № 1, 2019, 014001.

[8] Ombrello T., Blunck D.L., Resor M. Quantified infrared imaging of ignition and combustion in a supersonic flow // *Experiments in Fluids*, Vol. 57, № 9, 2016, pp. 1–12.

[9] Znamenskaya I.A., Koroteeva E.Y., Timokhin M.Y., Mursenkova I.V., Glazyrin F.N., Tatarenkova D.I. Experimental investigation of the flow dynamics and boundary layer in a shock tube with discharge section based on digital panoramic methods // *International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2018): AIP Conference Proceedings*, Vol. 2027, 2018, 030161 (doi: 10.1063/1.5065255).

[10] Tatarenkova D. I., Koroteeva E. Y., Kuli-zade T. A., Karnozova E. A., Znamenskaya I. A., Sysoev N. N. Pulsed discharge-induced high-speed flow near a dielectric ledge // *Experiments in Fluids*, Vol. 62, № 7, 2021, 151 (doi: 10.1007/s00348-021-03253-0).

[11] Extrusion of a nanosecond surface discharge plasma near a dielectric ledge / I. Znamenskaya, D. Tatarenkova, I. Mursenkova, T. Kuli-Zade, E. Karnozova // *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 2100, 2021, 012010 (doi:10.1088/1742-6596/2100/1/012010).

[12] Astarita T., Carlomagno G.M. *Infrared Thermography For Thermo-Fluid-Dynamics*. Springer Science & Business Media, 2012, 226 p.

[13] Znamenskaya I.A. Methods for Panoramic Visualization and Digital Analysis of Thermophysical Flow Fields. A Review // *Scientific Visualization* 13.3, 2021, pp. 125 – 158, (doi: 10.26583/sv.13.3.13).

# The Discharge Heated Channel Region Visualization based on Thermal Imaging Registration

I.A. Znamenskaya<sup>1</sup>, E.A. Karnozova<sup>2</sup>, T.A. Kuli-Zade<sup>3</sup>

Lomonosov MSU (Moscow State University), Department of Physics

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-6362-9496, [znamen@phys.msu.ru](mailto:znamen@phys.msu.ru)

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-9611-443X, [karnozova.ea16@physics.msu.ru](mailto:karnozova.ea16@physics.msu.ru)

<sup>3</sup> ORCID: 0000-0003-0249-6292, [tahir@physics.msu.ru](mailto:tahir@physics.msu.ru)

## **Abstract**

The paper presents the results of non-stationary thermal fields panoramic visualization, obtained on the stand UTRO-3 (Shock tube – Discharge – Optics) of the Lomonosov Moscow State University Faculty of Physics based on infrared thermography. The main purpose of the work was to study the heating and cooling processes in a rectangular channel region under the influence of pulsed surface high-current discharges sliding over the dielectric surface, taking into account the supersonic flow in a channel with an obstacle structures. A pulsed surface discharge initiated in a 24x48 mm channel was studied in an initially quiescent gas and in a high-speed flow. When initiated in the flow (the delay time after the shock wave passage is up to 0.4 ms), the discharge plasma is localized mainly in the downwind region behind the reverse step (rectangular ledge). The discharge produces a pulsed (submicrosecond) energy input with a 30 mm length in the localization zone. As a result, there is a short-term heating of the section of the channel wall adjacent to it. Using infrared (IR) thermographic imaging through the chamber quartz windows transparent to IR radiation, it was recorded in the discharge chamber that the induced discharge plasma noticeably heats the surface of the flat channel wall. Based on the obtained data of panoramic visualization with an exposure up from 200  $\mu$ s, we studied the channel walls cooling evolution both in quiescent air and at different oncoming flow velocities – in the downwind region behind the dielectric ledge.

**Keywords:** infrared thermography, panoramic visualization, thermal fields evolution, high-speed shooting, nanosecond discharge, high speed flow, shock waves.

## **References**

- [1] Rodrigues F., Pascoa J., Trancossi M. Heat generation mechanisms of DBD plasma actuators // *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol 90, 2018, pp. 55–65.
- [2] Jukes T. N., Choi K.-S., Johnson G. A, Scott S. J. Characterization of surface plasmainduced wall flows through velocity and temperature measurements // *AIAA Journal*, Vol. 44, № 4, 2006, pp. 764–771.
- [3] Starikovskt A. Yu., Alexandrov N. L. Gasdynamic flow control by superfast local heating in a strongly nonequilibrium pulse plasma // *Fizika Plazmy*, Vol. 47, № 2, 2021, pp. 126–192. [in Russian]
- [4] Zhou S., Su L., Shi T., Zheng T., Tong Y., Nie W., Che X., Zhao J. Experimental study on the diffusive flame stabilization mechanism of plasma injector driven by AC dielectric barrier discharge // *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 52, № 26, 2019, 265202.
- [5] Zheng H., Liang H., Chen J., Zong H., Meng X., Xie L., Li Y. Experimental study on plasma actuation characteristics of nanosecond pulsed dielectric barrier discharge // *Plasma Science and Technology*, Vol. 24, № 1, 2022, 015505.

- [6] Chen J., Liang H., Wu Y., Wei B., Zhao G., Tian M., Xie L. Experimental Study on Anti-Icing Performance of NS-DBD Plasma Actuator // *Applied Sciences*, Vol. 8, № 10, 2018, pp. 1889.
- [7] Liu Y., Kolbakir C., Hu H., Starikovskiy A., Miles R.B. An experimental study on the thermal characteristics of NS-DBD plasma actuation and application for aircraft icing mitigation // *Plasma Science and Technology*, Vol. 28, № 1, 2019, 014001.
- [8] Ombrello T., Blunck D.L., Resor M. Quantified infrared imaging of ignition and combustion in a supersonic flow // *Experiments in Fluids*, Vol. 57, № 9, 2016, pp. 1–12.
- [9] Znamenskaya I.A., Koroteeva E.Y., Timokhin M.Y., Mursenkova I.V., Glazyrin F.N., Tatarenkova D.I. Experimental investigation of the flow dynamics and boundary layer in a shock tube with discharge section based on digital panoramic methods // *International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2018): AIP Conference Proceedings*, Vol. 2027, 2018, 030161 (doi: 10.1063/1.5065255).
- [10] Tatarenkova D. I., Koroteeva E. Y., Kuli-zade T. A., Karnozova E. A., Znamenskaya I. A., Sysoev N. N. Pulsed discharge-induced high-speed flow near a dielectric ledge // *Experiments in Fluids*, Vol. 62, № 7, 2021, 151 (doi: 10.1007/s00348-021-03253-0).
- [11] Extrusion of a nanosecond surface discharge plasma near a dielectric ledge / I. Znamenskaya, D. Tatarenkova, I. Mursenkova, T. Kuli-Zade, E. Karnozova // *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 2100, 2021, 012010 (doi:10.1088/1742-6596/2100/1/012010).
- [12] Astarita T., Carlomagno G.M. *Infrared Thermography For Thermo-Fluid-Dynamics*. Springer Science & Business Media, 2012, 226 p.
- [13] Znamenskaya I.A. Methods for Panoramic Visualization and Digital Analysis of Thermophysical Flow Fields. A Review // *Scientific Visualization* 13.3, 2021, pp. 125 – 158, (doi: 10.26583/sv.13.3.13).