# Термографическая визуализация эволюции тепловых полей от плазменных актуаторов через окна разрядной камеры

И.А. Знаменская  $^{1}$ , Е.А. Карнозова  $^{1}$ , Т.А. Кули-Заде  $^{1}$ 

<sup>1</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Ленинские горы 1с2, Москва, 119234, Россия

#### Аннотация

В работе представлены результаты панорамной визуализации тепловых полей в разрядной камере, полученным на стенде УТРО-3 (Ударная труба-Разряд-Оптика) физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. 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. Импульсный поверхностный разряд, инициированный в канале 24х48 мм в высокоскоростном потоке (время задержки после прохода ударной волны - до 0,4 мс) локализуется преимущественно в подветренной области за обратным уступом (прямоугольной вставкой). Разряд создает импульсный (субмикросекундный) энерговклад 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, в разрядной камере зафиксировано, что индуцируемая плазма разряда заметно нагревает поверхность плоской стенки канала. По полученным данным панорамной визуализации с экспозицией от 100 мкс была исследована эволюция времени остывания стенок канала в подветренной области, импульсно нагретых в результате взаимодействия с плазмой поверхностного разряда, при различных скоростях набегающего потока.

#### Ключевые слова

Наносекундный разряд, инфракрасная термография, визуализация тепловых полей, высокоскоростная съемка, высокоскоростные течения, ударные волны.

# Thermographic Visualization of the Thermal Fields from Plasma **Actuators Through Discharge Chamber Windows**

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

<sup>1</sup> Lomonosov MSU, Department of Physics, Leninskie gory 1-2, Moscow, 119234, Russia

#### Abstract

The paper presents the panoramic visualization of thermal fields in the discharge section of the UTRO-3 experimental device of the Lomonosov Moscow State University Faculty of Physics. 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 in a high-speed flow (the delay time after the shock wave passage is up to 0.4 ms) is localized mainly in the downwind region behind the reverse step (rectangular insert). The discharge produces a pulsed (submicrosecond) energy input with a length of 30 mm 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 thermographic imaging through the chamber quartz

EMAIL: znamen@phys.msu.ru (И.А. Знаменская); karnozova.ea16@physics.msu.ru (Е.А. Карнозова); tahir@physics.msu.ru (Т.А. Кули-Зале)



ORCID: 0000-0001-6362-9496 (И.А. Знаменская); 0000-0001-9611-443X (Е.А. Карнозова); 0000-0003-0249-6292 (Т.А. Кули-Заде) © 2022 Copyright for this paper by its authors. Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

ГрафиКон 2022: 32-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-22 сентября 2022 г., Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, Рязань, Россия

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 100  $\mu$ s, we studied the cooling time of the channel walls in the downwind region evolution, heated rapidly due to the interaction with the surface discharge plasma, at various free flow velocities.

#### Keywords

Nanosecond discharge, infrared thermography, high speed flow visualization, shock waves, supersonic flow.

## 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 наносекундном 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 ИК-термографии, что означает, что температура газа в использованном разряде может быть приблизительно представлена вращательной температурой.

На основе сочетания высокоскоростной шлирен регистрации и метода инфракрасной термографии, были проведены исследования влияния ряда параметров (напряжение срабатывания, частота повторения, размер электрода) на разрядные характеристики, поля индуцированного потока и тепловые характеристики NS-DBD разряда [5]. 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 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. Визуализация тепловых полей при инициировании импульсных поверхностных разрядов

В канале камеры низкого давления однодиафрагменной ударной трубы прямоугольного сечения 24 × 48 мм<sup>2</sup> [9] встроена специальная разрядная секция (рисунок 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 (ПР), скользящего по поверхности диэлектрика в пространстве между медными плазменными электродами, установленными заподлицо на диэлектрических поверхностях верхней и нижней стенки [10]. ПР одновременно инициировался на верхней и нижней стенках разрядной секции и представлял собой два тонких плазменных слоя (плазменные листы). Площадь каждого плазменного листа составляла  $100 \times 30$  мм<sup>2</sup>. 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  $48 \times 6 \times 2$  мм<sup>3</sup>. Наличие уступа создавало 6-мм зазор в нижнем плазменном слое, изменявший локальное распределение электрического поля разряда, тем самым повышая локальный импульсный энерговклад – 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

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 - 2000 кадр/с и  $t_e = 0,2 - 1,0$  мс, соответственно.

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) [11].

Оптические 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 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.

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 посредствам 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) – (в) представлены тепловизионные изображения, полученные при покадровой визуализации теплового излучения (F = 1,0 мс,  $t_e = 0,6$  мс) от диэлектрических поверхностей нижней стенки канала в области вставки. ПР инициировался в покоящемся воздухе с начальным давлением  $124 \pm 2$  торр. На кадрах (а) – (в) представлены результаты термографической визуализации после наложения фильтра и вычета фона для устранения пересветки. При этом интенсивность по полученным данным с первого кадра (рисунок 2 (а)) исходно существенно превышала интенсивность, зарегистрированную на последующих кадрах тепловизионной съемки.



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

С помощью термографической съёмки были визуализированы тепловые поля, формирующиеся после дифракции набегающей плоской ударной волны (УВ) с числом Маха  $M_{\rm YB} = 2,8 - 3.2$  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<sub>p</sub> в канале разрядной секции инициировался импульсный поверхностный разряд. При инициировании импульсного ПР 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 УВ наветренной стенки препятствия и моментом инициирования импульсного поверхностного разряда варьировалось в пределах  $t_p = 0,06 - 1,00$  мс. На данном временном интервале скорость потока достаточно высока: 600 - 800 м/с [9]. Выбор времени задержки позволяет инициировать разряд на разных стадиях развития потока. С течением времени скорость спутного потока за прошедшей УВ снижается, течение турбулизируется. Различные стадии эволюции потока соответствуют различным режимам локализации разряда. 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 3 (а) представлен кадр высокоскоростной теневой съемки через 0,06 мс после прохождения УВ передней кромки препятствия. В результате дифракции ударной волны на обратном уступе образуется вихрь (зона пониженной плотности за уступом см. численное моделирование соответствующего поля плотности (рисунок 3 (б))). 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 (рисунок 3 (в) – (е). Интегральные кадры свечения в видимом диапазоне плазмы разряда приведены на рисунке 3 (г), (е), t<sub>p</sub> = 0,06 и 0,34 мс, соответственно. В результате, происходит кратковременный нагрев участка прилегающей к области плазмы стенки канала (рисунок 3 (в), (д): кадры ИК-съемки теплового поля после инициирования плазмы разряда, экспозиция  $t_e = 1,0$  мс).



**Рисунок 3** – Визуализация тепловых полей: а) кадр теневой съемки визуализирующий область течения за обратным уступом в сверхзвуковом потоке за плоской УВ; б) численный расчет поля плотности; в) ,д) кадры тепловизионной съемки; г), е) 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 4 приведены последовательные изображения области потока после инициирования ПР в потоке за плоской УВ ( $M_{\rm VB} = 3,0 \pm 0,2$ ): через  $t_p = 0,34$  мс после прохода ударной волны. Частота 1000 к/с, экспозиция 0,6 мс. Реальная интенсивность нагретой области торможения уменьшается со временем – от кадра (а) к кадру (г). Кадры (б) – (г) демонстрируют релаксацию интенсивности теплового поля участка канала в зоне торможения. Для снижения разницы в интенсивности излучения разряда и зоны торможения при визуализации на рисунке 4 (а) был применен другой фильтр.



**Рисунок 4** – Кадры тепловизионной съемки: (1) – разряд, локализованный в вихревой области, (2) – область торможения потока, (3) – направление потока

При больших временных задержках и снижающейся скорости потока картина существенно меняется. С увеличением времени задержки головная ударная волна перед уступом ослабевает и отходит вверх по потоку, плотность газа в наветренной зоне понижается. Инициированный на данном этапе развития потока поверхностный разряд представляет собой два плазменных канала (длиной до 30 мм), расположенных около боковых стенок диэлектрического препятствия. Один из каналов – в подветренной области (отстоит от препятствия), другой (меньшей интенсивности) – в наветренной дозвуковой области. Для реализации данного режима в потоке за плоской УВ с  $M_{YB} = 3,0 \pm 0,2$  интервал задержки между плоской УВ и разрядом составляет  $t_p = 0,5 - 0,6$  мс. На рисунке 5 представлена визуализация разряда при инициировании ПР в потоке со скоростью около 600 м/с. Термографическое изображение – рисунок 5 (а), экспозиция  $t_e = 1,0$  мс. Соответствующее изображение интегрального свечения (в видимом диапазоне) плазмы разряда представлено на рисунке 5 (б).

По полученным термографическим данным была построена зависимость времени остывания участка поверхности нижней стенки канала, импульсно нагретой в результате взаимодействия с плазмой поверхностного разряда, при различных задержках. На рисунке 6 представлен график эволюции интенсивности теплового излучения от подветренной области. После релаксации плазмы участок подветренной области остается нагретым в течение времени 5 ± 0,5 мс.



Рисунок 5 — Визуализация тепловых полей (а) и интегральное изображение оптического свечения плазмы ПР (б): (1) — разряд, локализованный в вихревой области, (2) — разряд, локализованный в наветренной области, (3) — направление потока



**Рисунок 6** – Интенсивность теплового излучения в подветренной области при инициировании ПР при задержках 0,5 – 0,6 мс

## 3. Заключение

Проведено экспериментальное исследование тепловых процессов нагрева и остывания профилированного прямоугольного канала при воздействии импульсных участков 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 инфракрасное излучение проведена визуализация и исследованы пространственно-временные характеристики нагрева и остывания стенок канала с препятствием после инициирования сильноточного поверхностного разряда в высокоскоростном потоке за плоской ударной волной с числом Маха 2.8-3.2.

Показано, что времена релаксации полей теплового излучения от локально нагретых областей диэлектрических стенок канала длятся в высокоскоростном потоке за УВ при локализации ПР в подветренной области 1 – 2 мс (на временных задержках до 0,4 мс), 5 мс (на временных задержках 0,5 – 0,6 мс).

# 4. Благодарности

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

# 5. Список источников

[1] Rodrigues F., Pascoa J., Trancossi M. Heat generation mechanisms of DBD plasma actuators // Experimental Thermal and Fluid Science. 2018. 90, pp. 55–65. URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.09.005.

- [2] Characterization of surface plasmainduced wall flows through velocity and temperature measurements / T. N. Jukes, K.-S. Choi, G. A. Johnson, S. J. Scott // AIAA Journal. 2006. 44. № 4. pp. 764–771. doi:10.2514/1.17321.
- [3] Стариковский А., Александров Н. Управление газодинамическими потоками с помощью сверхбыстрого локального нагрева в сильнонеравновесной импульсной плазме // Низкотемпературная плазма. 2021. 47. № 2. С. 126–192. doi:10.31857/S0367292121020062.
- [4] Experimental study on the diffusive flame stabilization mechanism of plasma injector driven by AC dielectric barrier discharge / S. Zhou, L. Su, T.Shi, T. Zheng, Y. Tong, W. Nie, X. Che, J. Zhao // Journal of Physics D: Applied Physics. 2019. 52. № 26. Vol. 265202. URL: https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab15cd.
- [5] Experimental study on plasma actuation characteristics of nanosecond pulsed dielectric barrier discharge / H. Zheng, H. Liang, J. Chen, H. Zong, X. Meng, L. Xie, Y Li // Plasma Science and Technology. 2022. 24. № 1. P. 015505. doi:10.1088/2058-6272/ac35a3.
- [6] Experimental Study on Anti-Icing Performance of NS-DBD Plasma Actuator / J. Chen, H. Liang, Y. Wu, B. Wei, G. Zhao, M. Tian, L. Xie // Applied Sciences. 2018. 8. № 10. P. 1889. doi:10.3390/app8101889.
- [7] An experimental study on the thermal characteristics of NS-DBD plasma actuation and application for aircraft icing mitigation / Y. Liu, C. Kolbakir, H. Hu, A. Starikovskiy, R.B. Miles // Plasma Science and Technology. 2019. 28. № 1. Vol. 014001. URL: https://doi.org/10.1088/1361-6595/aaedf8.
- [8] Ombrello T., Blunck D.L., Resor M. Quantified infrared imaging of ignition and combustion in a supersonic flow // Experiments in Fluids. 2016. 57. № 9. pp. 1–12. doi:10.1007/s00348-016-2210-0.
- [9] Experimental investigation of the flow dynamics and boundary layer in a shock tube with discharge section based on digital panoramic methods / Znamenskaya I.A., Koroteeva E.Y., Timokhin M.Y., Mursenkova I.V., Glazyrin F.N., Tatarenkova D.I. // International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2018): AIP Conference Proceedings 2027. 2018. P. 030161. doi:10.1063/1.5065255.
- [10] Pulsed discharge-induced high-speed flow near a dielectric ledge / Tatarenkova D. I., Koroteeva E. Y., Kuli-zade T. A., Karnozova E. A., Znamenskaya I. A., Sysoev N. N. // Experiments in Fluids. 2021. 62. № 7. Vol. 151. URL: https://doi.org/10.1007/s00348-021-03253-0.
- [11] Astarita T., Carlomagno G.M. Infrared Thermography For Thermo-Fluid-Dynamics. Springer Science & Business Media, 2012.