

03

## Динамика тепловых полей на обтекаемой поверхности, нагретой ударной волной и импульсным разрядом

© И.А. Знаменская, Е.А. Карнозова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
119991 Москва, Россия  
e-mail: znamen@phys.msu.ru

Поступило в Редакцию 22 февраля 2024 г.  
В окончательной редакции 25 апреля 2024 г.  
Принято к публикации 2 мая 2024 г.

Проведено исследование термографическим методом динамики тепловых полей в пограничном слое на обтекаемой поверхности стенки канала рабочей камеры ударной трубы около прямоугольной вставки. Исследован нестационарный процесс нагрева и остывания зоны за отраженной от вставки ударной волной и зоны локализации импульсного приповерхностного разряда в потоке за вставкой в области отрыва потока. Регистрация излучения стенок в диапазоне 1.5–5.1  $\mu\text{m}$  ведется через боковые окна рабочей камеры, прозрачные как для теплового излучения стенок, так и для видимого излучения разряда. Показано, что в ударно-нагретой в течение сотен микросекунд поверхности канала в наветренной зоне перед вставкой остывание происходит за несколько миллисекунд. Остывание импульсно нагретой локализованным разрядом обтекаемой области стенки в подветренной зоне происходит за субмиллисекундное время.

**Ключевые слова:** ударная труба, зона отрыва, инфракрасная термография, тепловые потоки, локализованный скользящий разряд.

DOI: 10.61011/JTF.2024.06.58125.45-24

### Введение

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 [1], так и прикладное значение, связанное с определением свойств теплозащитных материалов, обеспечением оптимальных условий обтекания поверхностей, а также горения в камерах сгорания летательных аппаратов [2,3]. При моделировании подобных процессов возможно реализовывать и контролировать достаточно широкий диапазон параметров течений на ударных трубах различных типов [4,5]. Нагрев обтекаемой поверхности может быть вызван ударно-волновым воздействием и воздействием газодинамического потока, а также плазменным воздействием различной длительности — при инициировании разрядов разного типа. Однако время рабочего режима в таких установках ограничено. Для локальных измерений теплового потока в импульсных газодинамических и плазмодинамических процессах используются различные специальные датчики [1,4]. Для определения пространственно-временных характеристик динамических тепловых полей были использованы тепловизионные устройства [5]: 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 тепло-

го 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.

Высокоскоростная термография используется для исследования нестационарных процессов, происходящих и в аэродинамических трубах [6]. С помощью высокоскоростного инфракрасного термографа была проведена регистрация колебаний температуры на нагретой тонкой фольге. Высокое пространственное (около 2 mm) и временное (около 100 Hz) разрешения делают возможным измерение пространственно-временного распределения тепловых потоков в аэродинамической трубе. Проводятся термографические исследования тепловых потоков и в режиме стационарного обтекания препятствий; в [7] получена термограмма обтекания цилиндра, снятая через прозрачные для инфракрасного излучения боковые окна в сверхзвуковом стационарном потоке с числом Маха  $M = 3$  после установления термодинамического равновесия.

Инфракрасная термография используется для бесконтактной регистрации самых различных тепловых процессов [8]; в частности, важные результаты были получены при изучении взаимодействия струй топливно-воздушных смесей со стенками в исследованиях двигателей [9]. Анализ тепловизионных изображений, полученных с противоположной от зоны инъекции стороны фольги, показал эффективность распылительного охлаждения при увеличении температуры стенки.

Регистрация динамики тепловых полей применяется как один из методов диагностики процессов, происходящих в плазменных устройствах [10,11]. Проводились измерения температуры боковой поверхности наружного электрода плазменного ускорителя спустя 5 ms после разряда с помощью тепловизора в спектральном диапазоне 3.7–4.8  $\mu\text{m}$  и временем интегрирования 1 ms при частоте кадров 200 Hz [11]. Показано, что термография боковой поверхности электрода позволяет определить положение разряда в ускорителе. Нагрев диэлектрической поверхности, создаваемый плазменными актуаторами, исследуется различными методами, включая инфракрасную термографию [12]. Показано, что термография может обеспечить информацию о пространственном и временном распределении температуры диэлектрика. Ведутся попытки установить связь между распределением температуры поверхности диэлектрика и температурой газа [13]. Различные наблюдения показывают, что преобладающий механизм передачи тепла от плазмы в диэлектрик происходит за счет конвекции от потока горячего воздуха. При зажигании диэлектрического барьерного разряда (DBD) в отсутствие внешнего потока [14] измерения показывают быстрое и значительное повышение температуры диэлектрика, порядка 50°C. Во внешнем набегающем потоке наблюдается быстрое падение температуры диэлектрика; проведенные измерения температуры показывают, что турбулентный пограничный слой над разрядом обеспечивает существенно лучший отвод тепла, чем ламинарный.

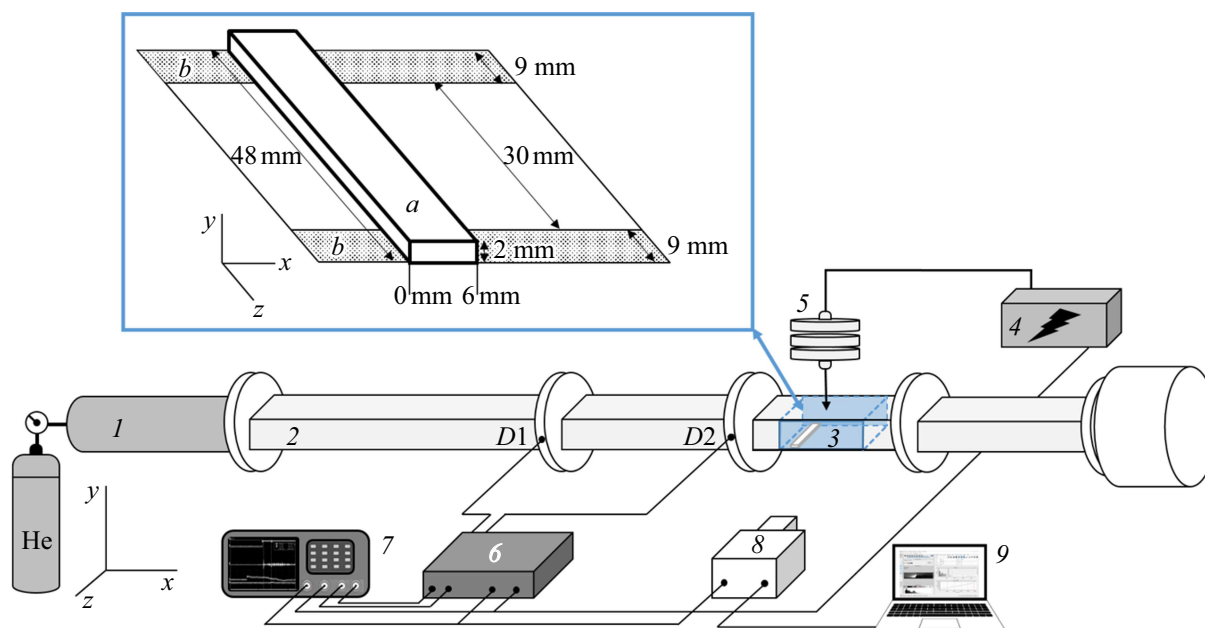
Управление высокоскоростным потоком газа включает в себя ударно-волновое воздействие на поток, изменение тепловых потоков на обтекаемых поверхностях, энергоподвод. При этом контролируются зоны отрыва пограничного слоя, ламинарно-турбулентный переход, положение скачков и др. В общем случае механизмы воздействия импульсного (субмикросекундного) приповерхностного энергоподвода в поток на основе электрического разряда различны на разных временных масштабах. В задачах управления потоками с помощью плазмы импульсных разрядов 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) [15]. Затем в микросекундном временном диапазоне реализуется нагрев поверхности ударно-волновыми, газодинамическими процессами, вызванными импульсным энергоподводом в потоке; далее нагретая плазмой и потоком поверхность остывает.

Целью настоящей работы является панорамное исследование эволюции тепловых полей и сравнительный анализ пространственно-временных характеристик областей, связанных с газодинамическим и плазменным механизмами нагрева участков стенки газодинамического канала с прямоугольной вставкой, на основе методики высокоскоростной инфракрасной термографии.

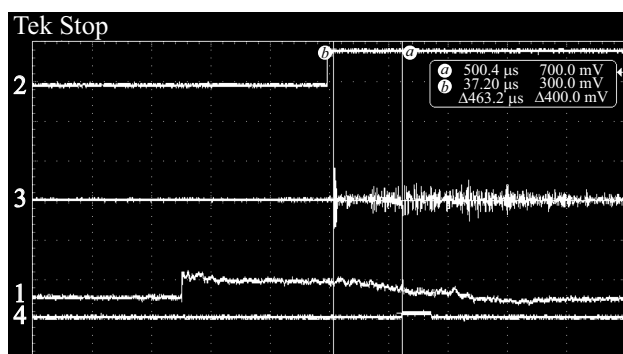
## 1. Экспериментальная установка

Эксперименты проводились на стенде УТРО-3 (Ударная Труба-Разряд-Оптика) (рис. 1). В канале камеры низкого давления 2 однодиафрагменной ударной трубы прямоугольного сечения 48 × 24 mm встроена специальная разрядная секция 3 того же сечения с боковыми стенками толщиной 15 mm, сделанными из кварцевого стекла. На верхней и нижней стенках разрядной камеры на расстоянии 24 mm друг от друга инициировались два высокопоточных скользящих по поверхности диэлектрика разряда (плазменные листы) [16]. Плазменный лист инициировался между парой медных электродов длиной 100 mm и толщиной 0.1 mm, расположенных заподлицо на диэлектрической стенке. Площадь плазменного листа составляла 100 × 30 mm. Импульс напряжения инициирует развитие распределенного скользящего разряда длительностью 100–200 ns. Импульсный поверхностный разряд в однородном потоке имел многоканальную структуру: он представлял собой набор параллельных плазменных микроканалов поперек потока длиной 30 mm, распределенных по поверхности диэлектрика протяженностью 100 mm. При инициировании разряда в неоднородном пограничном слое разряд локализуется преимущественно в области с низкой плотностью, в частности в зоны отрыва потока [15]. Для исследования эволюции тепловых полей 1) — в неоднородном нестационарном газодинамическом потоке и 2) — в потоке с локализованным импульсным энергоподводом, на нижней стенке канала была установлена диэлектрическая вставка в форме параллелепипеда. Она имела размер 48 × 6 × 2 mm и располагалась между двумя окнами на расстоянии 20 mm от начала зоны нижнего плазменного электрода. Термографические исследования тепловых полей проводились на нижней стенке канала (с вставкой). Разряд подключался через конденсатор 5, заряженный до напряжения ~ 25 kV, через блок запуска 4. Регистрация осциллограмм разрядного тока осуществлялась с помощью специального шунта (с полосой пропускания 1 GHz).

Сигналы от пьезодатчиков ( $D1$  и  $D2$  на рис. 1), установленных в канале ударной трубы, сигнал запуска тепловизионного регистратора и сигнал тока разряда фиксируются осциллографом Tektronix TPS 7. Полученные с осциллографа данные (рис. 2) позволяют рассчитать скорость фронта и число Маха ( $M$ ) ударной волны (УВ) в канале; определить момент запуска тепловизионной камеры, момент инициирования разряда. Это позволяет вычислить интервал времени между моментом прохождения УВ передней кромки диэлектрической вставки ( $t = 0$ ) и моментом инициирования разряда — время задержки ( $t_p$ ). Поскольку при проведении экспериментов длительность экспозиции кадра тепловизора (от 0.2 до 1.0 ms) существенно превосходит характерные времена исследуемых быстропотекающих газодинамических процессов (1–2  $\mu\text{s}$ ), необходимо, чтобы исследуемый временной интервал процесса газодинамического



**Рис. 1.** Схема экспериментального стенда: 1 — камера высокого давления, заполненная гелием, 2 — камера низкого давления, заполненная воздухом, 3 — разрядная секция, встроенная в камеру низкого давления: *a* — диэлектрическая вставка, *b* — медные электроды, 4 — блок запуска разряда с источником высокого напряжения, 5 — конденсатор, 6 — система синхронизации, 7 — осциллограф, 8 — тепловизор, 9 — комплекс программного обеспечения обработки термограмм. *D1*, *D2* — пьезодатчики, встроенные в канал ударной трубы.



**Рис. 2.** Сигналы, регистрируемые осциллографом. Горизонтальная шкала:  $400 \mu\text{s}$  в клетке, 1 — сигнал с датчика *D1* (проход УВ), 2 — сигнал запуска инфракрасной камеры, 3 — сигнал с датчика *D2* (проход УВ), 4 — сигнал, фиксирующий момент инициирования импульсного разряда, *a*, *b* — курсоры, позволяющие определить интересующие временные интервалы.

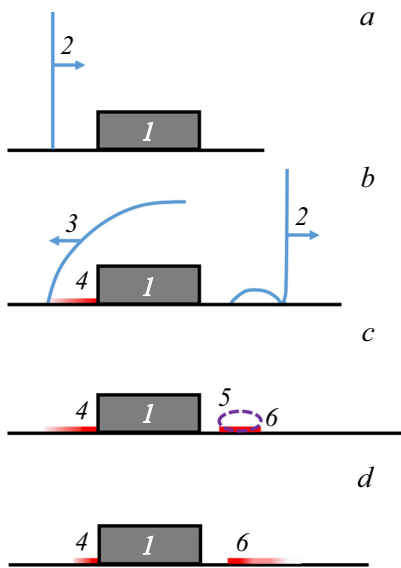
нагрева (и остывания) попал в интервал экспозиции кадра тепловизионной съемки. Запуск съемки камерой относительно запуска разряда от внешнего сигнала корректировался посредством системы синхронизации (*b* на рис. 1).

Исследование тепловых полей внутри канала разрядной секции (регистрация теплового излучения от нижней поверхности канала) проводилось через боковые окна с помощью инфракрасной (ИК) камеры (тепловизи-

ра) Telops FAST M200. Спектральный диапазон камеры:  $1.5\text{--}5.1 \mu\text{m}$ , частота съемки —  $\leq 2080 \text{ Hz}$ , длительность экспозиции кадра —  $\leq 0.2 \text{ ms}$ . Кварцевые окна камеры обладают высоким коэффициентом пропускания инфракрасного излучения в рабочем диапазоне тепловизора. Регистрация во всех экспериментах велась под углом  $87^\circ$  от нормали к нижней поверхности стенки. Ввиду конструктивных особенностей стенда, увеличить угол наблюдения не представлялось возможным. Сравнение тепловых полей на всех тепловизионных кадрах проводилось при учете того, что 1) — коэффициент излучения при углах  $60\text{--}90^\circ$  от нормали к регистрируемой поверхности слабо зависит от материала (металл, диэлектрик) [17]; 2) — угол съемки в экспериментах не изменялся. Цифровые фотоаппараты Nikon D50 и Canon EOS 500D регистрировали в видимом диапазоне интегральные изображения свечения плазмы разряда.

## 2. Результаты и обсуждение

Термографической съемкой были визуализированы тепловые поля, формирующиеся на нижней стенке канала после взаимодействия плоской УВ с числом Маха  $M = 2.8\text{--}3.3$  с прямоугольной вставкой (препятствием). Параметры газа (однородного потока) за плоской УВ определяются из соотношений Рэнкина-Гюгонио по известным значениям параметров среды перед фронтом УВ и скорости УВ (числу Маха). Затем в потоке может отличаться последующий порядок движения разрывов и



**Рис. 3.** Схема нагрева нижней стенки канала: 1 — вставка, 2 — падающая УВ, 3 — отраженная УВ, 4 — зона нагрева в наветренной области, 5 — область локализации плазмы разряда, 6 — зона нагрева в подветренной области (после разряда).

возмущений в области рабочей камеры стенда — при реализации различных начальных условий (преимущественно при варьировании давлений в камерах высокого и низкого давлений) [18]. Изменение температуры газа за фронтом ударной волны и в потоке за ней приводит к соответствующему изменению во времени тепловых потоков на обтекаемых поверхностях, к нагреву внутренних поверхностей канала: верхней и нижней стенок рабочей камеры, трех стенок препятствия, боковых стенок. В первые сотни микросекунд после прохождения ударной волны с использованными значениями числа Маха через препятствие спутный поток-сверхзвуковой перед вставкой-препятствием в канале возникает отраженная ударная волна (волна торможения), которая с течением времени отходит вверх по потоку. За это время (менее 1 ms) горячий газ за отходящей УВ нагревает участки плоской верхней стенки, нижней стенки с вставкой, а также внутренние поверхности двух боковых стенок разрядной секции [19]. Затем набегающий спутный поток перестает быть сверхзвуковым, изменяется картина обтекания препятствия. После прихода отраженной от торца камеры высокого давления холодной волны разрежения (через 1–3 ms) стенки охлаждаются.

Проведены исследования тепловых полей нижней стенки в окрестности прямоугольной вставки — с наветренной и подветренной сторон. Полученные последовательные термограммы отражают динамику нагрева и остывания этих областей. Так, при прохождении УВ с числом Маха  $M = 3.0 \pm 0.2$  температура воздуха перед ее фронтом составляла 297 К, температура за фронтом УВ — порядка 800 К. После прохождения УВ диэлектрической вставки в потоке за ней с различной

задержкой в канале разрядной секции инициировался импульсный поверхностный разряд. Тепловое излучение от областей, нагретых короткоживущим плазменным образованием, также регистрировалось тепловизором.

При инициировании поверхностного разряда в сверхзвуковом потоке реализуются два основных механизма нагрева нижней стенки канала (схема показана на рис. 3). Тепловые процессы включают 1) — взаимодействие набегающей и отраженной УВ в наветренной области с нижней стенкой (рис. 3, *a, b*) и 2) — взаимодействия плазмы разряда и инициируемых им возмущений с нижней стенкой в подветренной области — за препятствием (рис. 3, *c, d*).

Тепловизионные изображения, включающие свечение плазмы разряда, не фиксируют тепловое излучение плазмы [3]. Масштабы времен, характерные для тепловых процессов и данных съемки с помощью используемой в эксперименте ИК камеры (миллисекундный диапазон), существенно превышают наномикросекундные импульсные процессы при инициировании разряда. Таким образом, один кадр тепловизионной съемки представляет собой интегральное изображение, отражающее не только излучение наносекундного плазменного образования, но и фиксирующее данные тепловых полей, зарегистрированные в отсутствие плазмы, т. е. в последующие моменты времени (в пределах времени экспозиции). Система синхронизации позволяет контролировать время начала регистрации. В результате на второй и последующих термограммах основным источником теплового излучения являются участки диэлектрических поверхностей в межэлектродной области, остывающие после окончания импульсного нагрева (плазма разряда на первом кадре отстоит от каждой из боковых стенок на 8–9 mm — ширину электрода).

Время задержки между моментом прохождения плоской УВ наветренной стенки препятствия и моментом инициирования импульсного поверхностного разряда варьировалось в пределах  $t_p = 0.06–1.00$  ms. На данном временном интервале скорость потока достаточно высока (более 700–800 m/s). С течением времени скорость спутного потока за прошедшей УВ снижается, течение турбулизируется. Выбор времени задержки позволяет инициировать разряд на разных стадиях развития потока.

Перераспределение разряда происходит в соответствии с изменением картины течения при обтекании потоком диэлектрического препятствия [15]. Различные стадии эволюции потока соответствуют различным режимам локализации разряда около препятствия. После дифракции ударной волны за обратным уступом образуется зона отрыва (зона пониженной плотности). При инициировании импульсного поверхностного разряда в таком потоке на участке нижней стенки со вставкой плазма разряда локализуется в подветренной зоне отрыва (пониженной плотности) в виде короткоживущего сильноточного плазменного канала [15].

Поверхностный разряд, инициируемый в данном режиме течения, визуализируется как короткоживущее



**Рис. 4.** Интегральный снимок оптического свечения плазмы разряда в потоке за УВ. Стрелками указано направление потока, штрих — границы препятствия.

плазменное образование, представляющее собой поперечный плазменный канал длиной около 30 мм, параллельный боковой стенке препятствия (рис. 4). В подветренной области за обратным уступом реализуется субмикросекундный энерговыход в зоне локализации разряда [15]. В результате происходит кратковременный нагрев соответствующего участка нижней стенки канала.

Проведена термографическая регистрация тепловых полей на стенках канала рабочей камеры ударной трубы при одновременном тепловом воздействии импульсной локализованной приповерхностной плазменной области и ударно-волновом нагреве поверхностей после нестационарного взаимодействия УВ с препятствием. Сравнивались пространственно-временные параметры тепловых полей на нижней стенке, вызванных плазменным нагревом и пограничным слоем в потоке за плоской и отраженной УВ.

На рис. 5 представлены последовательные изображения тепловых полей нижней стенки канала после прохода плоской УВ с числом Маха  $M = 2.8$  (рис. 5, *a, b*), при инициировании поверхностного разряда (рис. 5, *c*) и последующей эволюции тепловых полей данного участка (рис. 5, *d–f*). Разряд инициирован через время задержки  $t_p = 0.85$  мс, эллипсом обозначена зона нагрева разрядом. Штриховыми линиями обозначены границы нижней стенки с препятствием. Горизонтальные штриховые линии показывают положения линий пересечения нижней стенки с боковыми окнами. В дальнем окне отражаются: слева от вставки — горячая область наветренной стенки препятствия в зоне торможения потока (рис. 5, *a, b, d–f*) и справа от вставки — плазма разряда (рис. 5, *c*).

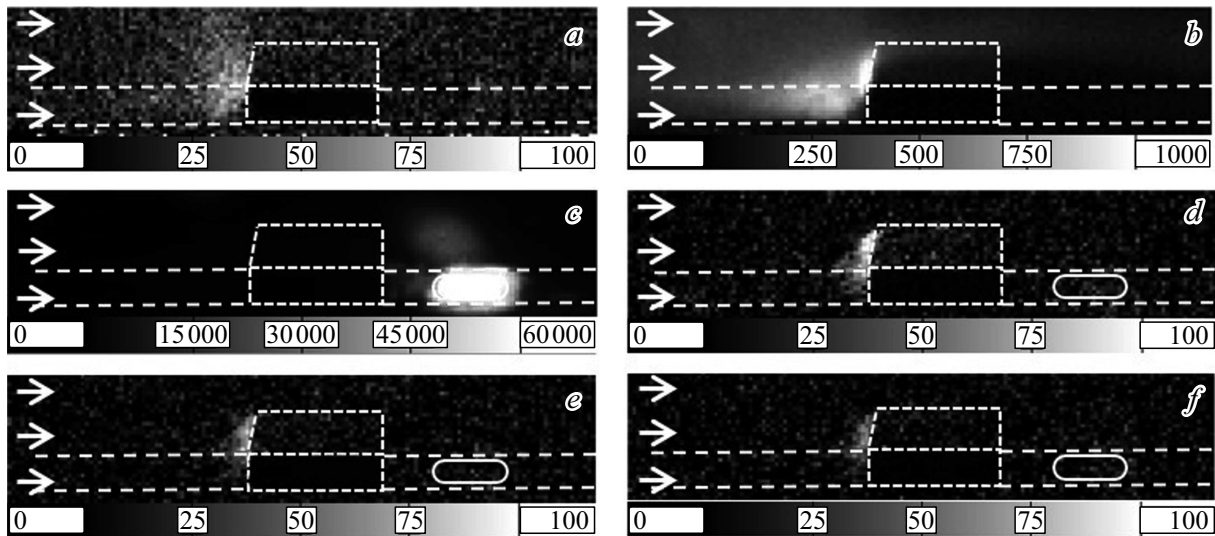
Количественные измерения теплового излучения были проведены в одной шкале интенсивности в условных единицах (а. е.) (рис. 6). Изменение диапазона значений на шкалах изображений, приведенных на рис. 5, *b, c*, обусловлено изменением предельного значения излучения на термограммах в различные моменты времени. Так, на рис. 5, *c* интенсивность излучения от участка нижней стенки в подветренной области (свечение плазмы разряда) существенно превосходит значения интенсивности в наветренной зоне; в выбранном диапазоне интенсивности, обусловленном излучением области разряда, наветренная область выглядит темной, несмотря на то,

что в ней присутствует тепловой поток, превышающий фоновые значения.

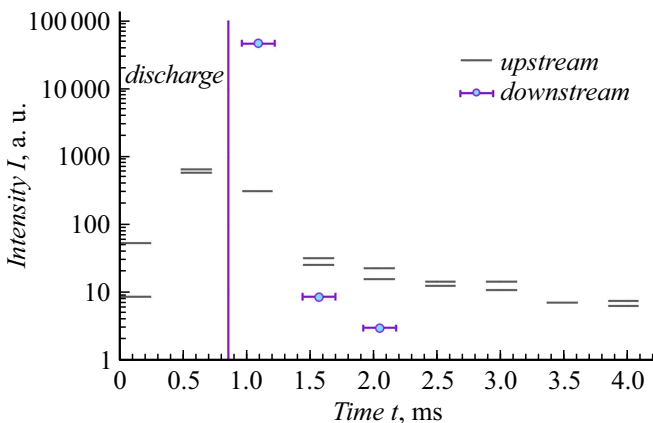
Полученные из серии панорамных снимков данные позволяют проследить за изменением во времени интенсивности излучения в подветренной и наветренной областях вблизи от препятствия. Для анализа динамики тепловых процессов были построены временные зависимости остывания областей, локально нагретых плазмой разряда, и проведено сравнение с данными, полученными при нагреве и остывании участков канала в потоке без инициирования разряда (рис. 6). На графике представлены значения интенсивности теплового излучения от двух соответствующих участков поверхности нижней стенки канала ударной трубы от времени после прохода УВ ( $t = 0$ ) передней стенки вставки ( $x = 0$  мм, (рис. 1)).

Линиями обозначены средние, зарегистрированные тепловизором, значения интенсивности излучения нижней стенки перед вставкой (время экспозиции кадра  $250 \mu\text{s}$ ). Усреднение проводилось по области зарегистрированного на термограммах наиболее интенсивного излучения нижней стенки; зона опроса имела длину 2 мм ( $x = -2-0$  мм), охватывая всю ширину нижней стенки (от стекла до стекла). Реальный размер выбранного участка нижней стенки  $2 \times 48$  мм, на термограммах размер области опроса составлял  $2 \times 2$  мм, поскольку съемка велась под углом к поверхности нижней стенки. Вертикальной линией на графике отмечен момент времени инициирования поверхностного разряда и его локализации в подветренной области (рис. 3, *c*). Длительность тока разряда составляет порядка 150 нс, за этот отрезок времени выделяется большая часть энергии разряда [20]. В приповерхностной подветренной зоне течения теплообмен происходит в области отрыва. Ввиду кратковременности контакта плазмы с поверхностью, теплопроводность в стенку за этот отрезок времени не реализуется, в отличие от радиационно-конвективного теплообмена. Точками представлены средние измеренные значения интенсивности теплового излучения нижней стенки в подветренной области после инициирования плазмы разряда. Измерения проводились по области регистрации длиной 1.5 мм:  $x = 12-13.5$  мм — в зоне ниже по потоку от области локализации разряда.

За время экспозиции первого кадра ( $t = 0.00-0.25$  мс) УВ проходит по каналу рабочей камеры ударной трубы; пограничный слой в спутном потоке нагревает поверхности стенок. Далее в наветренной области в результате обтекания вставки набегающим потоком около прямого уступа возникает отраженная УВ, взаимодействующая со всеми стенками канала перед вставкой. Она также подогревает нижнюю стенку в наветренной области, что видно на графике как подъем интенсивности ( $t = 0.0-0.8$  мс). Данные, представленные на рис. 6, свидетельствуют, что интенсивность теплового излучения наветренной поверхности нижней стенки увеличивается и достигает максимального значения через 0.5–0.8 мс. При этом



**Рис. 5.** Последовательные тепловизионные изображения, частота съемки 2080 Hz, время экспозиции одного кадра 0.25 ms: *a, b* — газодинамический нагрев нижней стенки в наветренной области, *c* — излучение нижней стенки из зоны локализации разряда, *d–f* — остывание нагретых областей в потоке.



**Рис. 6.** Зависимости интенсивности теплового излучения нижней стенки канала (в условных единицах) от времени. Число Маха УВ  $M = 2.8$ .

максимальная протяженность зоны газодинамического нагрева нижней стенки увеличивалась с 2 mm (область усреднения) до 5–6 mm вверх по потоку ( $x = 6-0$  mm). Со временем отраженная ударная волна отходит вверх по потоку и ослабевает. Происходит остывание нижней стенки канала в набегающем потоке, наблюдается спад интенсивности теплового излучения. Тепловое излучение релаксирует в течение 3–4 ms по мере остывания спутного потока после прохода нагретой ударной волной пробки. Наиболее длительное остывание наблюдалось вблизи наветренной стенки прямого уступа в зоне торможения потока.

В заданный момент времени ( $t = 0.85$  ms) инициируется поверхностный разряд в потоке за ударной волной, который быстро нагревает зону нижней стенки

в области локализации импульсного энерговыклада (в зоне отрыва — низкой плотности). Показано, что там нагрев поверхности до максимума интенсивности происходит за время порядка  $100 \mu\text{s}$  после инициирования плазмы разряда. Видно, что значения интенсивности нагретой энерговыкладом области существенно превышают значения теплового излучения газодинамического нагрева наветренной стенки. На кадре, полученном после инициирования разряда ( $t = 0.95$  ms), наблюдается максимальная интенсивность излучения ниже зоны разрядного канала. При этом наветренная область имеет интенсивность теплового излучения намного меньшую, чем подветренная. На следующем кадре через 0.5 ms в подветренной области измеренный нагрев плазмой разряда уже меньше, чем в наветренной области. Обе интенсивности теплового излучения превышали фоновые значения и составляли порядка 30 и 10 условных единиц в наветренной и подветренной областях соответственно. Нагретая разрядом область локализации плазмы быстро остывает: ввиду кратковременности нагрева поверхности механизм теплопроводности стенки не реализуется. К моменту времени  $t = 1.5$  ms ( $t = 0.65$  ms после разряда) тепловой след практически отсутствует. Показано, что релаксация теплового излучения стенки в подветренной области локализации плазмы происходит менее чем за 1 ms. При этом отмечено, что конечная интенсивность теплового излучения от области локализации разряда была ниже, чем конечная интенсивность в наветренной области, подогревавшейся газом за отраженной волной в течение длительного времени — до прихода холодной зоны потока (волны разрежения в спутном потоке, сформированной при разрыве диафрагмы и отразившейся от торца камеры высокого давления).

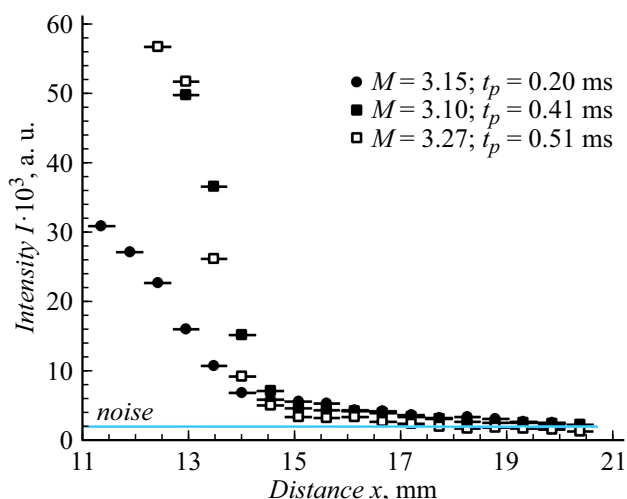


Рис. 7. Распределение интенсивности (в условных единицах) теплового излучения нижней стенки в подветренной области для различных чисел Маха УВ и времен задержки  $t_p$ .

Для анализа области нагрева плазмой разряда была построена зависимость теплового излучения нижней стенки от расстояния вдоль направления потока (рис. 7).

На графике представлено распределение интенсивности теплового излучения нижней стенки ниже по потоку от области локализации плазмы разряда. Временной интервал каждого измерения 0.5 ms — продолжительность экспозиции кадра, время задержки между моментом прохождения УВ и моментом инициирования разряда  $t_p$  менялось. Числа Маха набегающей УВ равны  $M = 3.10$  (черные квадраты),  $M = 3.15$  (точки),  $M = 3.27$  (белые квадраты), время задержки увеличивалось от  $t_p = 0.20 \pm 0.05$  ms (точки), до  $t_p = 0.41 \pm 0.05$  ms (черные квадраты) и  $t_p = 0.51 \pm 0.05$  ms (белые квадраты). Рост интенсивности теплового излучения (примерно в 2 раза), по-видимому, связан с тем, что в интервал времени экспозиции (0.5 ms) при задержке инициирования разряда после прохода ударной волны 0.20 ms время нагрева стенки могло не попасть целиком, а лишь частично. При увеличении задержки в 2–2.5 раза соответственно возрастает время регистрации собственно воздействия разряда на стенку; наблюдается наибольшее значение интенсивности излучения, накопленного за увеличенное время регистрации. Расстояние  $x$  отсчитывается от наветренной стенки препятствия (рис. 1). Значения снимались от области локализации плазмы (зона оптического излучения) до конца регистрируемой на кадре области, что соответствует расстоянию  $21.00 \pm 0.25$  мм. Данная зона оптического излучения менялась для разных времен задержки. Показано, что интенсивность теплового излучения наибольшая вблизи области локализации плазмы и при наибольшем времени задержки (и регистрации) (11 мм для  $M = 3.15$ ,  $t_p = 0.20 \pm 0.05$  ms; 12 мм для  $M = 3.27$ ,  $t_p = 0.51 \pm 0.05$  ms; 13 мм для  $M = 3.1$ ,  $t_p = 0.41 - 0.05$  ms). При удалении от области

локализации плазмы примерно на расстоянии 17–19 мм от наветренной стенки вставки интенсивность существенно падает и выходит на уровень шума (горизонтальная линия на рис. 7). Это связано с тем, что разряд обеспечивает кратковременный нагрев потока в области своей локализации, и уносимое потоком тепло из нагретой области не успевает прогреть стенку канала, расположенную ниже по направлению движения потока.

## Заключение

Проведено исследование термографическим методом динамики тепловых полей в пограничном слое на обтекаемой поверхности стенки газодинамического канала (ударной трубы). Для исследования эволюции тепловых полей в неоднородном нестационарном газодинамическом потоке и в потоке с локализованным наносекундным разрядом на нижней стенке канала была установлена диэлектрическая вставка в форме параллелепипеда размером  $48 \times 6 \times 2$  мм. Вставка располагалась между окнами рабочей камеры. Зарегистрированы тепловизором в диапазоне 1.5–5.1 м через боковые окна рабочей камеры с экспозицией кадра 250–500  $\mu$ s нестационарные процессы нагрева и остывания стенки канала перед вставкой и за ней после взаимодействия плоской УВ с числом Маха  $M = 2.8 - 3.3$  с прямоугольным уступом. Сравнивались пространственно-временные характеристики тепловых полей: 1) в зонах нагрева и остывания наветренной области за отраженной от вставки ударной волной и 2) в потоке за вставкой в подветренной области в зоне локализации импульсного приповерхностного разряда.

Получено распределение интенсивности теплового излучения стенки в подветренной области отрыва ниже по потоку от области локализации плазмы разряда. Построена зависимость интенсивности теплового излучения нижней стенки канала (в условных единицах) от времени для различных времен задержки инициирования разряда в нестационарном потоке за ударной волной.

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 3–4 ms происходит спад интенсивности (после прихода волны разрежения). Максимальная регистрируемая тепловизором протяженность зоны газодинамического нагрева нижней стенки перед вставкой оценивается как 5–6 мм.

Остывание области подветренного участка стенки канала за вставкой, импульсно нагретой локализованным в зону отрыва скользящим наносекундным разрядом, происходит за значительно меньшее время — менее 1 ms; протяженность зоны прогрева — до 4 мм вниз по потоку.

## Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-0096.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] М.А. Котов, П.В. Козлов, В.Ю. Левашов, Г.Я. Герасимов, Н.Г. Соловьев, А.Н. Шемякин, М.Ю. Якимов, В.Н. Глебов, Г.А. Дуброва, А.М. Малютин. Письма ЖТФ, **49**(17), 36 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.17.56086.19633 [M.A. Kotov, P.V. Kozlov, V.Yu. Levashov, G.Ya. Gerasimov, N.G. Solovyov, A.N. Shemyakin, M.Yu. Yakimov, V.N. Glebov, G.A. Dubrova, A.M. Malutin. Tech. Phys. Lett., **49**(9), 34 (2023). DOI: 10.61011/TPL.2023.09.56705.19633]
- [2] M. Fenot, E. Dorignac. Int. J. Therm. Sci., **109**, 386 (2016). DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2016.06.010
- [3] T. Ombrello, D.L. Blunck, M. Resor. Exp. Fluids., **57**, 140 (2016). DOI: 10.1007/s00348-016-2210-0
- [4] Ю.В. Добров, В.А. Лашков. ЖТФ, **92**(9), 1327 (2022). DOI: 10.21883/JTF.2022.09.52923.39-22 [Yu.V. Dobrov, V.A. Lashkov. Tech. Phys., **67**(9), 1137 (2022). DOI: 10.21883/TP.2022.09.54676.39-22]
- [5] И.А. Знаменская, М.И. Муратов. Письма ЖТФ, **49**(16), 42 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.16.55968.19643 [I.A. Znamenskaya, M.I. Muratov. Tech. Phys. Lett., **49**(8), 77 (2023). DOI: 10.61011/TPL.2023.08.56695.19643]
- [6] H. Nakamura. *Spatio-Temporal Measurement of Convective Heat Transfer Using Infrared Thermography, Heat Transfer - Theoretical Analysis, Experimental Investigations and Industrial Systems*, ed. by Prof. Aziz Belmiloudi (National Defense Academy, Japan, 2011)
- [7] S.S. Popovich, N.A. Kiselev, A.G. Zditovets, Y.A. Vinogradov. J. Phys.: Conf. Ser., **2039**, 01202 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/2039/1/012029
- [8] В.П. Вавилов. *Инфракрасная термография и тепловой контроль*, 2-е изд., доп. (Издат. дом „Спектр“, М., 2013)
- [9] M. Zaccara, C. Carvallo, A. Montanaro, J. Gimeno, L. Allocca, G. Cardone. Exp. Therm. Fluid Sci., **142**, 110825 (2023). DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2022.110825
- [10] А.В. Воронин, В.Ю. Горяинов, В.К. Гусев. ЖТФ, **90**(6), 1028 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.06.49294.372-19 [A.V. Voronin, V.Yu. Goryainov, V.K. Gusev. Tech. Phys., **65** (6), 987 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220060286]
- [11] В.Ю. Горяинов, М.Е. Викторов, А.В. Водопьянов, А.В. Воронин. ЖТФ, **91**(2), 335 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.02.50370.153-20 [V.Yu. Goryainov, M.E. Viktorov, A.V. Vodop'yanov, A.V. Voronin. Tech. Phys., **66**(2), 325 (2021). DOI: 10.1134/S1063784221020134]
- [12] X. Zhang, Yu. Zhao, Ch. Yang. Chinese J. Aeronaut., **36**(1), 1 (2023). DOI: 10.1016/j.cja.2022.01.026
- [13] R. Tirumala, N. Benard, E. Moreau, M. Fenot, G. Lalizel, E. Dorignac. J. Phys. D: Appl. Phys., **47**, 255203 (2014). DOI: 10.1088/0022-3727/47/25/255203
- [14] R. Jousset, V. Boucinha, R. Weber-Rozenbaum, H. Rabat, A. Leroy-Chesneau, D. Hong. *40th Fluid Dynamics Conference and Exhibit* (Chicago, Illinois, USA, 2010), DOI: 10.2514/6.2010-5102
- [15] I. Znamenskaya, A. Lutsky, D. Tatarenkova, E. Karnosova, N. Syshev. Phys. Fluids, **35**, 076110 (2023). DOI: 10.1063/5.0153624
- [16] И.А. Знаменская, Д.Ф. Латфуллин, И.В. Мурсенкова. ДАН, **427**(1), 32 (2009)
- [17] В.В. Коротаяев, Г.С. Мельников, С.В. Михеев, В.М. Самков, Ю.И. Солдатов. *Основы тепловидения* (НИУ ИТМО, СПб., 2012), с. 17.
- [18] Д.И. Долбня. канд. дисс. (МГУ им. М.В. Ломоносова, М., 2023), <https://dissovet.msu.ru/dissertation/2580>
- [19] И.А. Знаменская, М.И. Муратов, Е.А. Карнозова, А.Е. Луцкий. Научная визуализация, **15**(3), 92 (2023). DOI: 10.26583/sv.15.3.10 [I.A. Znamenskaya, M.I. Muratov, E.A. Karnozova, A.E. Lutsky. Sci. Vis., **15**(3), 92 (2023). DOI: 10.26583/sv.15.3.10]
- [20] I.V. Mursenkova, A.Yu. Kuznetsov, A.S. Sazonov. Appl. Phys. Lett., **115**, 114102 (2019). DOI: 10.1063/1.5116810