

03

Воздействие импульсного разряда на динамику остывания ударно-нагретой обтекаемой поверхности

© Е.А. Карнозова, И.А. Знаменская

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: Liza.Karnozova@yandex.ru

Поступило в Редакцию 9 июля 2026 г.

В окончательной редакции 12 августа 2026 г.

Принято к публикации 17 августа 2026 г.

Экспериментально исследовано влияние импульсного объемного энерговклада на тепловые процессы при остывании модели затупленного цилиндра в потоке за ударной волной с $M = 3.0\text{--}3.7$. Высокоскоростная теневая съемка и инфракрасная термография с высоким пространственным и временным разрешением использованы для регистрации эволюции ударно-волновой структуры течения и нестационарных тепловых полей на поверхности модели. Показано, что инициирование наносекундного объемного разряда перед фронтом ударной волны приводит к дополнительному нагреву поверхности модели и значительному увеличению интенсивности ее теплового излучения при остывании. Различия кривых остывания при инициировании энерговклада и в его отсутствие сохраняются до $15\text{--}20\text{ ms}$.

Ключевые слова: ударная волна, импульсный разряд, нестационарный тепловой поток, инфракрасная термография.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.22.63885.20841

Вопросы связи газодинамических и тепловых процессов, вызванных быстрым подводом энергии в поток, являются важной темой исследования в области управления высокоскоростными течениями. Влияние импульсных разрядов на тепловые характеристики потока и обтекаемых поверхностей исследуется в современных работах по газовой динамике [1–3]. С целью регистрации и анализа тепловых процессов в задачах аэродинамики все чаще применяется метод инфракрасной (ИК) термографии [3,4]. Данный бесконтактный метод может использоваться для исследования нестационарных тепловых процессов как совместно с другими способами регистрации и измерения тепловых потоков [1,5], так и в качестве самостоятельного инструмента регистрации [4]. Данные, зарегистрированные на ИК-снимках (термограммах), позволяют получать панорамное распределение теплового излучения и пространственно-временные характеристики тепловых полей на исследуемом участке течения, в том числе в сверхзвуковых режимах [6,7].

В настоящей работе исследуется влияние импульсного объемного энерговклада на пространственно-временные параметры теплового излучения, регистрируемого от поверхности модели в потоке за плоской ударной волной. С помощью высокоскоростной теневой съемки проводится визуализация газодинамических структур течения, формирующихся при инициировании импульсного объемного разряда перед фронтом плоской ударной волны, а также их анализ. Методом высокоскоростной ИК-термографии регистрируются сопутствующие нестационарные тепловые поля во время высокоскоростного обтекания модели. С целью сравнительного анализа нестационарных тепловых полей проводится регистрация значений интенсивности ИК-излучения от участков поверхности

обтекаемой модели в высокоскоростном газодинамическом течении без инициирования импульсного энерговклада, а также в присутствии плазмы разряда, самолокализованной перед фронтом плоской ударной волны.

Эксперименты по взаимодействию модели с плоской ударной волной с $M = 3.0\text{--}3.7$, нестационарным течением за ней и импульсным энерговкладом проводятся в рабочей (разрядной) секции, вмонтированной в канал камеры низкого давления однодиафрагменной ударной трубы стенда УТРО-3 [8]. Рабочая секция имеет прямоугольное сечение $24 \times 48\text{ mm}$. Рабочая секция ударной трубы в начале каждого эксперимента заполнена воздухом, начальное давление которого составляет порядка 20 Torr. Внутри канала рабочей секции располагается разрядный промежуток — пространство размером $100 \times 24 \times 30\text{ mm}$ между вмонтированными заподлицо на верхней и нижней стенках парными медными электродами. В разрядном промежутке инициируется импульсный наносекундный комбинированный объемный разряд с предыонизацией ультрафиолетовым излучением от плазменных листов [9]. Подводимая на электроды энергия и удельный энерговклад (при инициировании плазмы разряда в однородном воздухе при начальном давлении порядка 20 Torr) оцениваются как величины порядка $0.6 \pm 0.1\text{ J}$ и $0.037 \pm 0.002\text{ eV/mol}$ соответственно. Модель затупленного цилиндра установлена по центральной оси течения затупленной (носовой) частью навстречу набегающему потоку. Она имеет диаметр 7.5 mm и частично входит внутрь разрядного промежутка (на 15 mm от подветренного края электродов). Боковые стенки рабочей секции представляют собой окно из кварцевого стекла размером $170 \times 24\text{ mm}$ и толщиной 16 mm, прозрачного в видимом диапазоне и

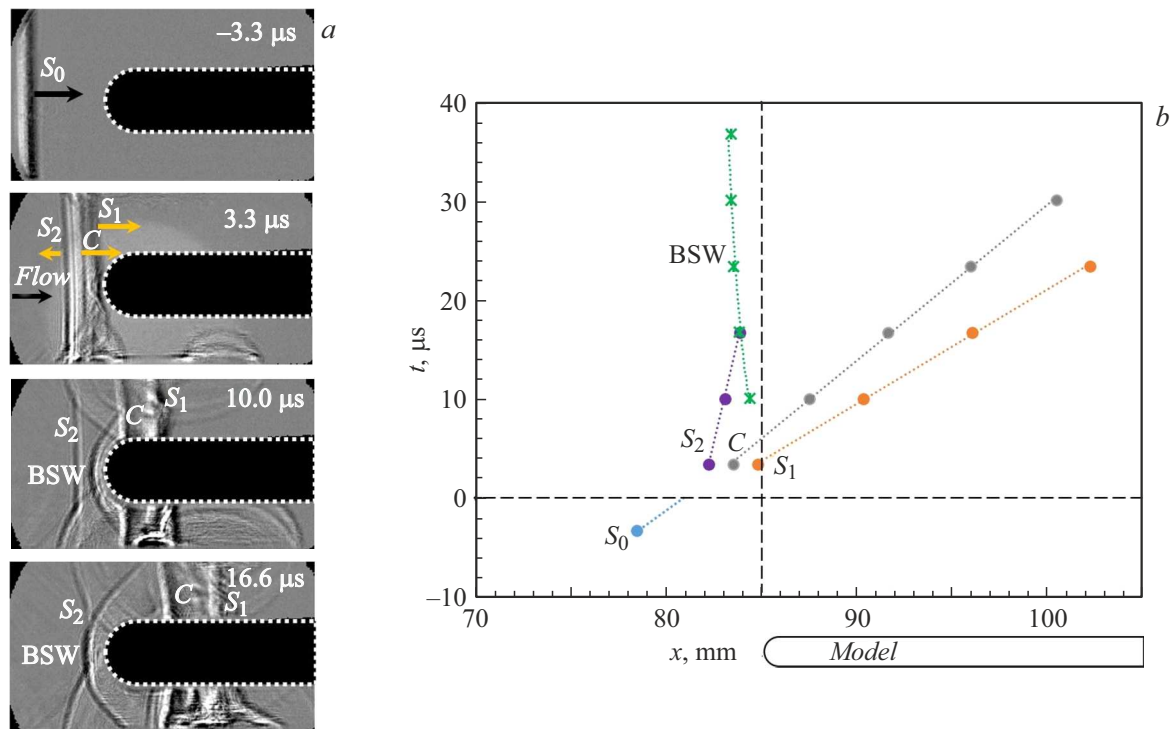


Рис. 1. Динамика ударных волн S_0 , S_1 , S_2 , контактной поверхности C и головной ударной волны BSW в случае реализации энерговклада перед моделью. a — последовательные теневые кадры, b — x - t -диаграмма.

части ИК-диапазона. Через оптические окна в пучке параллельных лучей лазерного источника освещения ведется высокоскоростная теневая регистрация газодинамических структур с частотой 150 000 fps и экспозицией 1 μs. Регистрация ИК-излучения от исследуемой области внутри канала рабочей секции проводится с помощью ИК-камеры Telops Fast M200 (тепловизора), установленной напротив переднего оптического окна перпендикулярно оси течения. Частота тепловизионной регистрации составляет 1000 Hz с экспозицией 250–500 μs. С целью уменьшения влияния фонового излучения заднее оптическое окно закрывается черным матовым экраном. С учетом рабочего диапазона тепловизора и диапазона пропускания кварцевого стекла регистрируемое ИК-излучение лежит в диапазоне 0.2–2.8, 3.0–3.8 μm. Регистрируемая на термограммах интенсивность теплового излучения представлена в относительных безразмерных условных единицах (а.е.) и используется для анализа качественных характеристик тепловых полей и определения эволюции излучения от поверхности модели во времени во всей области наблюдения.

Взаимодействие плоской ударной волны и потока за ней с моделью сопровождается нагревом поверхности модели за счет передачи энергии ударно-нагретого потока воздуха через пограничный слой [7]. Наибольшая температура потока реализуется за ударной волной в начальные моменты времени в горячей „пробке“, длительность которой в экспериментах с ударной волной

с $M = 3.0$ – 3.7 составляет порядка 330–280 μs. При этом по соотношениям Ренкина–Гюгонно температура воздуха в спутном потоке составляет $T = 800$ – 1000 К. Тепловое поле поверхности обтекаемой модели характеризуется неравномерным распределением интенсивности ИК-излучения. Вблизи точки торможения при сверхзвуковом обтекании происходит контакт поверхности модели с ударным слоем за головной ударной волной, максимальная температура газа в точке торможения достигает $T = 1500$ К. После завершения горячей пробки ввиду прихода контактной поверхности, за которой следует полностью турбулентный дозвуковой поток холодной смеси гелия с небольшим количеством воздуха, теплообмен между набегающим нестационарным потоком и моделью меняется: наблюдается процесс охлаждения поверхности модели.

Наличие импульсного энерговклада в результате инициирования наносекундной плазмы объемного разряда существенно изменяет газодинамическую картину течения. При прохождении плоской ударной волны по разрядному промежутку (до момента ее контакта с носком модели) плазма разряда локализуется в зоне пониженной плотности — перед фронтом плоской ударной волны. При этом в момент инициирования плазмы разряда ($t = 0$ μs) фронт плоской ударной волны практически мгновенно (в течение 200 ns) становится границей раздела двух областей с различными термодинамическими параметрами (газа за фронтом ударной волны и плазмы перед ним), что приводит к реализации задачи Римана

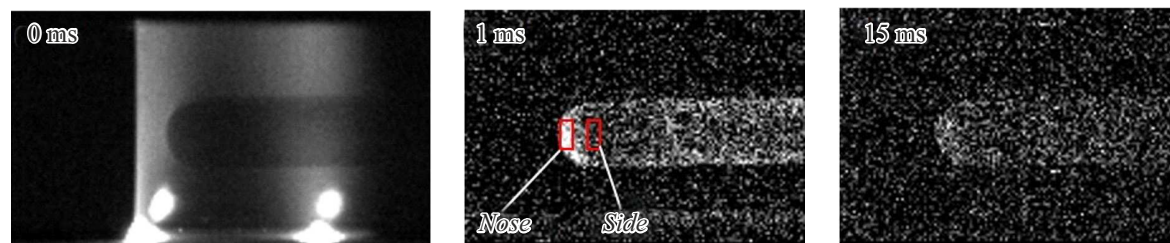


Рис. 2. Последовательные термограммы регистрируемого излучения.

о распаде разрыва [8]. На рис. 1 покадровые теневые изображения и $x-t$ -диаграмма, построенная на основе результатов высокоскоростной теневой съемки, показывают газодинамические структуры и их положение после реализации энерговклада (две ударные волны S_1 , S_2 и контактная поверхность C). Данные координат S_0 , S_2 , BSW измерялись на оси течения, координаты S_1 и C — на середине участка фронта сверху модели.

До момента инициирования разряда ($t < 0 \mu s$) в канале рабочей секции наблюдается одна плоская ударная волна S_0 , которая движется вдоль разрядного промежутка по направлению к модели. В отсутствие плазменного воздействия волна S_0 движется вниз по каналу рабочей секции, дифрагируя на модели, в результате чего перед носовой частью модели образуется головная ударная волна BSW. При этом плоская волна S_0 продолжает двигаться вдоль модели. Иницирование разряда перед фронтом плоской волны S_0 приводит к распаду разрыва и образованию на месте S_0 трех разрывов: ударная волна S_1 , контактная поверхность C и ударная волна S_2 . Скорости ударной волны S_1 и контактной поверхности C сонаправлены с движением набегающего потока. Данные разрывы, взаимодействуя с моделью, достаточно быстро движутся вниз по каналу и выходят из области регистрации. Движение ударной волны S_2 направлено в противоположную сторону — навстречу набегающему высокотемпературному потоку воздуха. Со временем S_2 также сносится вниз по течению, однако ее смещение происходит намного медленнее. При этом ударная волна S_2 взаимодействует с головной ударной волной BSW, возникшей перед препятствием после прохода S_1 затупленной части модели. Также идет взаимодействие с поперечными ударными волнами от плазменных листов, распространяющимися от верхней и нижней стенок. Как видно из рис. 1, спустя примерно $12-14 \mu s$ ударная волна S_2 , не доходя до носовой части модели, взаимодействует с головной ударной волной BSW и сливается с ней. При этом на оси течения поток нагретого газа тормозится, продолжая прогревать область вблизи носовой части модели до момента прихода контактной поверхности и холодного газа за ней. Таким образом, реализация энерговклада перед фронтом падающей ударной волны приводит к образованию новых структур, торможению нагретого потока и, как следствие, к дополнительному нагреву в исследуемой области.

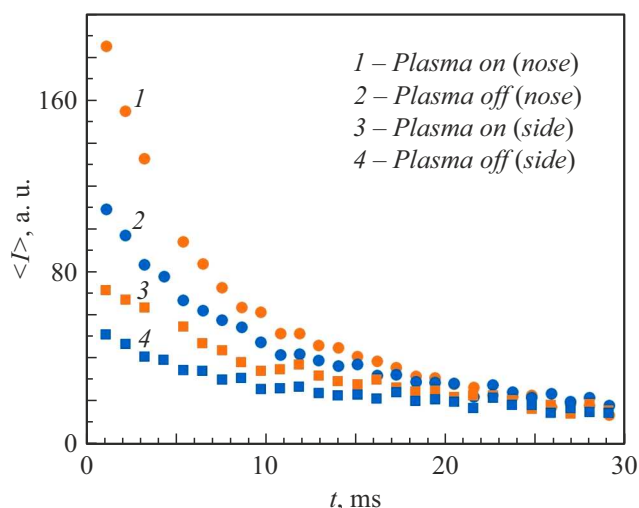


Рис. 3. Сравнение остывания участков модели в потоке с энергоподводом и без него.

С целью анализа теплового эффекта от импульсного энерговклада на обтекание модели проводились регистрация и сравнение эволюции тепловых полей в случаях: 1) газодинамического ударно-волнового течения; 2) газоплазменного течения при самолокализации наносекундного объемного разряда перед фронтом набегающей плоской ударной волны. На рис. 2 приведены последовательные термограммы (экспозиция $250 \mu s$) регистрируемого излучения в случае течения с энерговкладом. Первый кадр включает в себя интенсивное свечение из плазменной области внутри разрядного промежутка с четкой левой границей, соответствующей положению фронта набегающей ударной волны S_0 . Последующие кадры ($t \geq 1 ms$) визуализируют тепловое излучение от поверхности модели в дозвуковом потоке за контактной поверхностью. С течением времени наблюдается охлаждение поверхности модели. Наибольшие значения интенсивности регистрируются вблизи затупленной носовой части модели (*Nose*).

Анализ серий последовательных термограмм показал, что повышенные значения излучения от затупленной части модели наблюдаются в течение нескольких десятков миллисекунд как в случае без инициирования плазмы разряда, так и в случае наличия импульсного энерговклада (рис. 3). При этом для обоих случаев про-

водилось сравнение интегральных данных интенсивности теплового излучения от двух участков поверхности модели на оси симметрии: от зоны торможения в затупленной части (*Nose*, рис. 2) и на боковом участке (*Side*, рис. 2) вблизи зоны отрыва течения. Представленные значения усреднены по прямоугольным областям регистрации, каждая площадью порядка 5 mm^2 (66 pixel^2). Увеличение времени интеграции ($250\text{--}500 \mu\text{s}$) приводит к усреднению значений излучения в нестационарном потоке, сглаживанию кривой.

Обнаружено, что наличие энерговклада увеличивает значения интенсивности теплового излучения, регистрируемые при остывании поверхности в обеих исследуемых областях. В первые $15\text{--}20 \text{ ms}$ кривые остывания после инициирования плазмы объемного разряда лежат выше кривых остывания, полученных в экспериментах без энерговклада. Максимальная разница значений регистрируемого излучения в зоне опроса в затупленной и боковой частях наблюдается в начальные моменты времени до 5 ms и может достигать порядка 40% . С течением времени температура набегающего газа снижается за счет эволюции потока, также снижаются и регистрируемые в эксперименте значения интенсивности теплового излучения от поверхности модели.

Оценки показали, что наибольшее значение скорости остывания наблюдается в затупленной области в интервале $t = 1\text{--}5 \text{ ms}$ и составляет около 21 и 10 a.u./ms для случая с энерговкладом и без энерговклада соответственно. Скорость остывания в боковой части на данном временном интервале оценивается порядка 4 a.u./ms как в случае инициирования разряда, так и без него. К моменту времени $t = 20\text{--}25 \text{ ms}$ значения интенсивности выходят на одну общую кривую.

Таким образом, инициирование импульсного объемного энерговклада оказывает существенное влияние на тепловые процессы при взаимодействии модели с высокоскоростным газоплазменным течением. Дополнительному нагреву поверхности модели способствует изменение ударно-волновой структуры течения перед носовой частью модели вследствие инициирования разряда. В результате наблюдается повышение до 40% значений интенсивности теплового излучения обтекаемой поверхности относительно значений, полученных без энерговклада. Данный эффект сохраняется при остывании поверхности модели в газовом потоке значительное время (до $15\text{--}20 \text{ ms}$).

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] С.Г. Давыдов, А.Н. Долгов, А.А. Козлов, В.О. Ревазов, Р.Х. Якубов, ЖТФ, **92** (10), 1517 (2022). DOI: 10.21883/JTF.2022.10.53244.106-22 [S.G. Davydov, A.N. Dolgov, A.A. Kozlov, V.O. Revazov, R.Kh. Yakubov, Tech. Phys., **67** (10), 1316 (2022). DOI: 10.21883/TP.2022.10.54358.106-22].
- [2] О.А. Азарова, О.В. Кравченко, Т.А. Лапушкина, А.В. Ерофеев, Письма в ЖТФ, **46** (13), 27 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.13.49587.18327 [O.A. Azarova, O.V. Kravchenko, T.A. Lapushkina, A.V. Erofeev, Tech. Phys. Lett., **46** (7), 649 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020070032].
- [3] X. Zhang, Y. Zhao, C. Yang, Chin. J. Aeronaut., **36** (1), 1 (2023). DOI: 10.1016/j.cja.2022.01.026
- [4] M. Zaccara, J.B. Edelman, G. Cardone, Int. J. Heat Mass Transfer, **163**, 120419 (2020). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120419
- [5] В.А. Лашков, Ю.В. Добров, М.Е. Ренев, И.Ч. Машек, Н.Ж. Джайчибеков, Б.С. Шалабаева, ЖТФ, **92** (4), 547 (2022). DOI: 10.21883/JTF.2022.04.52241.294-21 [V.A. Lashkov, Yu.V. Dobrov, M.E. Renev, I.Ch. Mashek, N.Zh. Dzhaichibekov, B.S. Shalabayeva, Tech. Phys., **67** (4), 456 (2022). DOI: 10.21883/TP.2022.04.53601.294-21].
- [6] F. Siddiqui, Sh. Ledbetter, J. Shine, R.D.W. Bowersox, M. Gragston, Exp. Fluids, **64**, 171 (2023). DOI: 10.1007/s00348-023-03716-6
- [7] I. Znamenskaya, M. Muratov, D. Dolbnya, Int. J. Therm. Sci., **214**, 109827 (2025). DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2025.109827
- [8] Е.А. Карнозова, И.А. Знаменская, А.Е. Луцкий, Н.Н. Сысоев, Инж.-физ. журн., **99** (4), 1190 (2026).
- [9] И.А. Знаменская, Д.А. Коротеев, Н.А. Попов, ТВТ, **43** (6), 820 (2005). <https://www.mathnet.ru/rus/tvt1454> [I.A. Znamenskaya, D.A. Koroteev, N.A. Popov, High Temp., **43**, 817 (2005). DOI: 10.1007/s10740-005-0129-x].