

УДК 536.245

ДИНАМИКА ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ НАГРЕТОЙ ИМПУЛЬСНЫМ СИЛЬНОТОЧНЫМ РАЗРЯДОМ ОБЛАСТИ КАНАЛА

© 2023 г. И. А. Знаменская*, Е. Ю. Коротеева, Е. А. Карнозова**, Т. А. Кули-Заде

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия***E-mail: znamen@phys.msu.ru****E-mail: karnozova.ea16@physics.msu.ru*

Поступила в редакцию 13.04.2022 г.

После доработки 19.07.2022 г.

Принята к публикации 13.10.2022 г.

Исследовалась динамика тепловых полей диэлектрических поверхностей, нагретых в результате инициирования импульсного сильноточного поверхностного разряда (плазменного листа). Генерация импульсного поверхностного разряда, скользящего по поверхности диэлектрика, происходила на верхней (плоской) и нижней (с уступом) стенках разрядной камеры с кварцевыми окнами. Получены последовательные изображения оптического (наносекундный диапазон) и инфракрасного (миллисекундный диапазон) излучений вблизи диэлектрической вставки в форме прямоугольного параллелепипеда размером $6 \times 2 \times 48 \text{ мм}^3$. С помощью покадровой съемки в инфракрасном диапазоне зарегистрирована при давлениях от 65 до 290 Торр эволюция теплового излучения поверхностей во времени. Показано, что время остывания нагретой плазмой области, локализованной вблизи диэлектрической вставки, может длиться до 30 мс и существенно превышает время остывания плоской верхней стенки, нагретой достаточно однородно распределенным по поверхности диэлектрика разрядом.

DOI: 10.31857/S0040364423010052

ВВЕДЕНИЕ

Перспективной областью применения разрядов различных типов (плазменных актуаторов) является управление высокоскоростными потоками как в камерах сгорания летательных аппаратов, так и на обтекаемых поверхностях [1].

В работах [2, 3] продемонстрирована возможность импульсно-периодического инициирования протяженного искрового разряда на поверхности аэродинамического тела, обтекаемого потоком воздуха, с частотой порядка кГц и энергией импульса порядка десятка мДж. Показано, что одиночный сильноточный разряд на поверхности аэродинамического тела влияет на картину обтекания в течение полетного времени, а при периодическом повторении процесса инициирования разряда может в стационарном случае изменить параметры внешнего обтекания, включая сверхзвуковое. В работе [4] продемонстрирована эффективность плазменного актуатора на основе микродиэлектрического барьерного разряда (DBDPA) как перспективной системы управления отрывными течениями. Для исследования индуцированного разрядом потока использованы регистрация свечения разряда, инфракрасная (ИК) термография, цифровое трассирование (PIV). В статье [5] исследованы три механизма нагрева, в том числе электронный нагрев газа из-за неупругих столкновений, ионная бомбардировка диэлектрической поверх-

ности и нагрев диэлектрической стенки переменным во времени электрическим полем. Показано, что основным механизмом нагрева диэлектрического материала и потока является нагрев ионным потоком. В работе [6] показано, что существует возможность влияния емкостного высокочастотного (ВЧ) разряда на характеристики ближнего следа за круговым цилиндром при скоростях потока до 100 м/с. По спектру оценены вращательная T_R и колебательная T_V температуры газа в разрядной плазме. Измеренные температуры составили соответственно $T_R \sim 1500 \text{ К}$ и $T_V \sim 3500 \text{ К}$. Средняя скорость нагрева газа в ВЧ-плазме превышала 30 К/мкс при мощности импульсного разряда 500 Вт и напряжении 20 кВ. В работе [7] вращательная температура плазмы, полученная с помощью оптической эмиссионной спектроскопии, оказалась близка к температуре, измеренной с помощью ИК-термографии. Это означает, что температура газа в разряде может быть приближенно представлена вращательной температурой. В работе [8] проведено измерение оптическим методом распределений температуры в потоке ионизованного газа, индуцированном ВЧ-барьерным разрядом. Взаимодействие с набегающим потоком приводило к тому, что максимум распределения осредненной температуры наблюдался в окрестности игольчатых электродов. Таким образом, несмотря на большое количество работ, метод ИК-термографии ранее

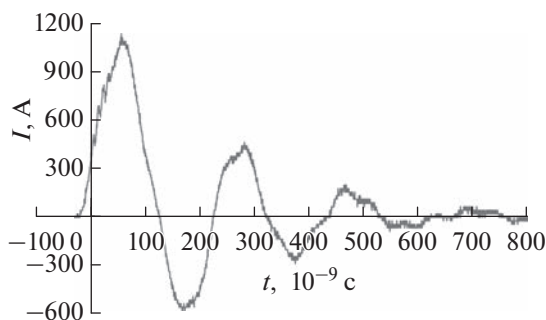


Рис. 1. Осциллограмма тока поверхностного разряда, инициируемого при начальном давлении 21 Торр в покоящемся воздухе.

применялся в основном к исследованию теплового воздействия разряда в стационарном или высокочастотном режиме.

На стенде физического факультета МГУ УТРО-3 скользящий субмикросекундный распределенный поверхностный разряд (плазменный лист) инициировался на стенках разрядной камеры прямоугольного сечения. Целью работы является исследование динамики ИК-излучения канала и видимого излучения плазмы при инициировании разряда в случае плоской стенки канала и в случае профиля с диэлектрическим уступом, а также сравнение с временами воздействия ударно-волнового течения, инициированного разрядом.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для создания плазменного листа — системы разрядов, скользящих по поверхности диэлектрика, используется специальная система электродов [9], изготовленная из двухстороннего фольгированного стеклотекстолита толщиной 1 мм. При приложении к электроду высоковольтного импульса напряжения на поверхности диэлектрика возникает ток смещения, который определяется величиной напряжения, крутизной его нарастания и переменной емкостью между поверхностным разрядом и вторым электродом, покрывающим противоположную сторону диэлектрика. Импульс напряжения с крутизной нарастания 10^{11} – 10^{12} В/с инициирует развитие скользящего разряда наносекундной длительности. При напряжении выше пробойного для данного разрядного промежутка вдоль поверхности диэлектрика формируется система параллельных каналов скользящего разряда. Скорость развития каналов составляет $\sim 10^6$ м/с [10].

На электроды подавалось импульсное напряжение 24–30 кВ. Ток разряда, регистрируемый низкоиндуктивным шунтом специальной конструкции с полосой пропускания 1 ГГц, достигал 1–2 кА за 30 нс. Характерный вид осциллограммы

тока поверхностного разряда представлен на рис. 1. С точки зрения характерных газодинамических времен энерговыделение в газ при инициировании плазменных листов происходит мгновенно. Плазменный лист позволяет создавать в покоящемся газе, в ламинарном, а также и в турбулентном пограничном слое область локального приповерхностного импульсного энерговыклада субмиллиметровой толщины [11]. Энергия, вводимая в газ, сравнима с энтальпией газа в трансзвуковом и сверхзвуковом потоке. Такой уровень энерговыклада позволяет, в частности, воздействовать на ударную волну, распространяющуюся вблизи поверхности [12], создавать неравновесные приповерхностные зоны пониженной плотности, в частотном режиме — сдвигать замыкающий скачок при трансзвуковом обтекании профиля и менять картину обтекания [13]. Воздействие на поток таким разрядом оказывается преимущественно за счет нелинейных ударно-волновых эффектов: ударные волны, распространяющиеся от приповерхностного слоя короткоживущей плазмы, взаимодействуют со структурами потока вблизи поверхности.

В ходе экспериментов два плазменных листа были инициированы на верхней и нижней стенках рабочей камеры сечением 24×48 мм². Каждый плазменный лист инициировался между парой медных электродов, размер одного плазменного листа составлял 100×30 мм², расстояние между ними — 24 мм. Поверхностные разряды были подключены через блок запуска к конденсатору, заряженному до напряжения 25 кВ [9]. Формы сигналов тока разряда, показанные на рис. 1, были записаны с использованием шунта, соединенного с осциллографом Tektronix TPS 2014 с полосой пропускания 100 МГц. Ток разряда составляет 800–1200 А и уменьшается с увеличением плотности газа в соответствии с увеличением сопротивления разрядного промежутка. Это связано с тем, что с увеличением плотности приведенное электрическое поле E/N уменьшается, что приводит к снижению скорости ионизации и увеличению времени, необходимого для достижения требуемой концентрации электронов. Для исследования влияния профилированного участка на распределение энерговыклада на нижней стенке канала между кварцевыми окнами камеры была установлена вставка из полиамида 4 размером $6 \times 2 \times 48$ мм³ (рис. 2). Было показано [14], что наличие выступа существенно искажает изначально однородное распределение плазмы разряда вдоль диэлектрической поверхности. По динамике индуцированного разрядом сложного высокоскоростного потока с использованием теневой визуализации (рис. 2а) и численного моделирования количественно проанализированы энергетические характеристики локализованного разряда. Явление вытеснения свечения импульсного разряда в сто-

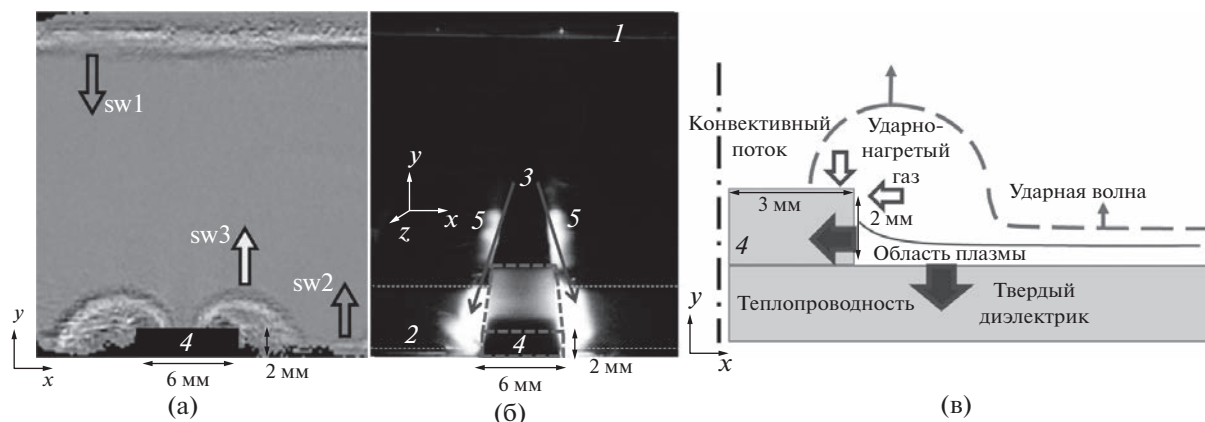


Рис. 2. Поверхностный разряд при начальном давлении 75 Торр: (а) — кадр теневой съемки спустя 6 мкс после импульсного разряда; (б) — интегральный снимок свечения; (в) — схема процесса; стрелками указаны: плоские ударные волны sw1 — вниз от верхнего 1 и sw2 — вверх от нижнего 2 плазменных листов; sw3 — квазицилиндрическая ударная волна от области интенсивного свечения 3, огибающая диэлектрическое препятствие 4; 5 — отражение в стекле области 3.

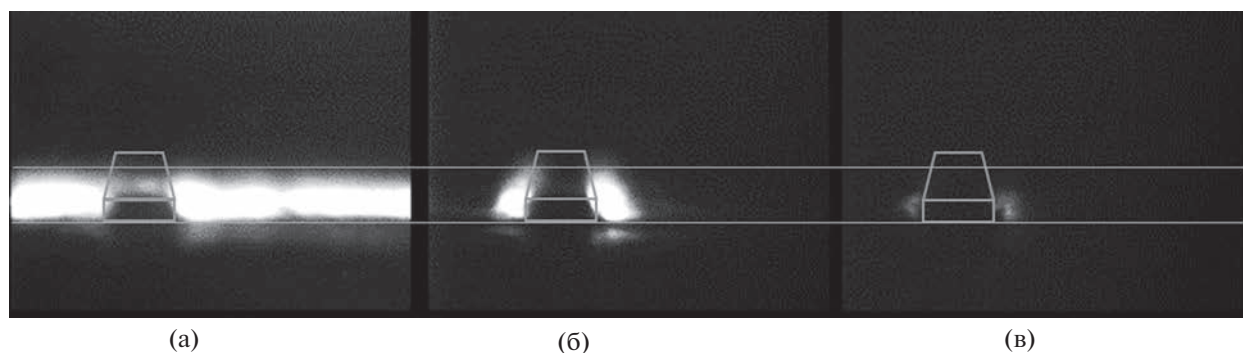


Рис. 3. Покадровые изображения свечения плазмы разряда в оптическом диапазоне (экспозиция — 100 нс) при начальном давлении 123 Торр, зарегистрированные в различные моменты времени: (а) — 0 нс, (б) — 200, (в) — 800.

рону выступа связано с мгновенным перераспределением энергии разряда, которая быстро термализуется в области выступа. Импульсный разряд инициирует сложную конфигурацию ударной волны: изогнутые ударные волны (рис. 2а), распространяющиеся снизу из области интенсивного свечения 3 вблизи выступа (рис. 2б). Показано, что концентрация быстро термализованной энергии разряда вблизи выступа увеличивается в 5–7 раз [14].

С целью анализа времени теплового воздействия разряда на поверхности стенок канала исследована динамика тепловых полей диэлектрических поверхностей, нагретых в результате инициирования плазмы разряда, и проведено сравнение со временем оптического свечения и временем ударно-волнового воздействия на среду. Регистрировались данные по эволюции свечения плазмы поверхностного разряда в оптическом диапазоне (камера Бифо КО11 — девятикадровая съемка, экспозиция — 100 нс, время между кадрами — 100 нс) и тепловых полей (тепловизионная съемка) после разряда. На цифровые фотоаппараты Nikon D50 и Canon

EOS 500D регистрировались интегральные изображения свечения разряда с двух ракурсов. Полученные покадровые изображения оптического свечения (рис. 3) показывают, что в первые 50–100 нс оптическое излучение нижнего плазменного листа практически однородно, кроме непосредственно области препятствия длиной 6 мм. Длительность тока разряда, инициируемого при начальном давлении $P \sim 90\text{--}125$ Торр, составляет порядка 300–500 нс (по осциллограммам тока). К этому времени на покадровых снимках наблюдается усиление интенсивности свечения нижнего плазменного листа в области диэлектрической вставки. После завершения тока разряда (спустя 300 нс) данное усиленное свечение плазмы релаксирует за время порядка 700–1500 нс. Теневая съемка послеразрядного потока (рис. 2а) показала [14], что время ударно-волнового воздействия на среду в канале ограничено 20–25 мкс.

Согласно оценкам, полученным для близких режимов инициирования плазменных листов [11], температура плазмы в области в среднем может повыситься в режиме сверхбыстрого нагрева до 1000 К

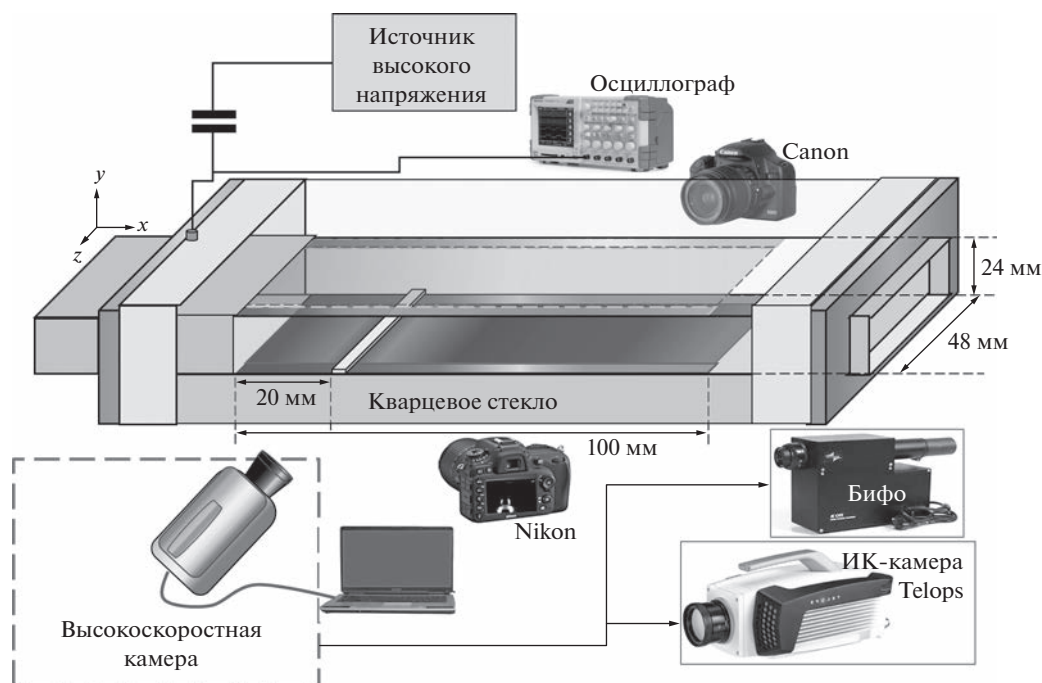


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: разрядная камера и регистрационная аппаратура.

за 1–2 мкс. При инициировании разряда происходит импульсный нагрев стенок канала и поверхности выступа. Повышаются температура нижней стенки за счет контакта с плазмой и температура выступа как за счет теплообмена с плазмой (боковые поверхности), так и за счет нагрева горячим спутным потоком за огibaющей уступ ударной волной, движущейся вверх (боковые и верхняя поверхности – рис. 2в).

Для анализа динамики нагрева и остывания поверхностей канала при инициировании на них скользящих разрядов использован тепловизор Telops Fast M200, который покрывает спектральный диапазон от 1.5 до 5.1 мкм. Ось наблюдения тепловизора устанавливалась вдоль вставки под углом 10° – 12° к поверхности горизонтальной стенки (рис. 4). Использовался ре-

жим скоростной съемки с экспозицией 1000 и 400 мкс и частотой съемки от 500 до 1417 кадр/с. Съемка велась через кварцевые окна камеры толщиной 15 мм, обладающие высоким коэффициентом пропускания инфракрасного излучения в рабочем диапазоне тепловизора.

Момент инициирования импульсного тока плазмы разряда был выбран как начало отсчета времени ($t = 0$) при покадровой регистрации теплового излучения через окна разрядной камеры. Интенсивность теплового излучения регистрировалась на последовательных изображениях, полученных при инициировании поверхностного разряда на верхней и нижней стенках (рис. 5). Регистрируемая ИК-камерой интенсивность на последовательных кадрах отражает динамику тепловых процессов на поверхности существенно позже иници-

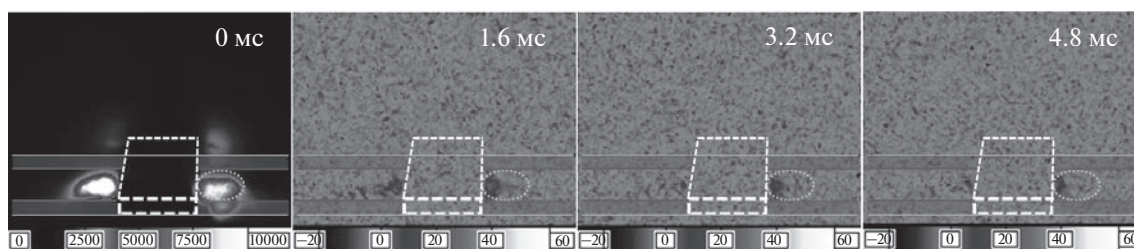


Рис. 5. Инфракрасная съемка остывания нижней стенки: экспозиция – 1 мс, частота регистрации – 628 кадр/с, начальное давление – 123 Торр, первый кадр – регистрация теплового излучения в течение первой миллисекунды с момента разряда, второй кадр и далее – тепловое излучение от нагретой области (выделена эллипсом) с интервалом 1.6 мс.

рования разряда и времени оптического свечения плазмы (измерения велись до ~40 мс).

Верхний плазменный лист при различных начальных давлениях в разрядной камере 65–290 Торр светился с разной интенсивностью. Средние значения относительной интенсивности теплового излучения от верхней и нижних стенок вблизи диэлектрической вставки, нагретых плазменным листом, представлены на рис. 6а и 6б соответственно. Погрешность времени (ось x) соответствует времени экспозиции. Следует отметить, что наблюдаемый в экспериментах эффект повышения уровня теплового излучения диэлектрических поверхностей является достаточно слабым. В этой связи общая неопределенность результатов измерений имеет порядок приборной погрешности, которая составляет 0.5 относительных единиц. Первый кадр в серии изображений, включающий интервал свечения плазмы, не представлен на графике (рис. 6), так как тепловизионные изображения свечения плазмы не отражают количественные параметры тепловых потоков [15]. Измерения выполнены для отраженных, излученных, рассеянных в среде тепловых потоков и потерь при прохождении излучения через окна камеры. Тем не менее тепловизором фиксировалось преимущественно излучение от нагретых стенок. Основным источником нагрева верхней плоской стенки явля-

ется теплопроводность при импульсном нагреве текстолита короткоживущим плазменным образованием — поверхностным разрядом. Источником нагрева области нижней стенки вблизи вставки и стенок самой вставки является как теплопроводность при импульсном нагреве плазменными каналами повышенной интенсивности, так и горячий конвективный поток за сгенерированными разрядом ударными волнами (рис. 2в).

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. Обработка термограмм с усреднением по области повышенной интенсивности показала, что время послеразрядного остывания стенок (регистрации тепловых потоков от них) в зонах вытеснения плазмы около прямоугольного диэлектрического профиля может достигать 30 мс; время остывания плоской стенки — до 3–4 мс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что воздействие сильнооточного субмикросекундного скользящего разряда на область поверхности с уступом реализуется через кратковременное (20–30 мкс) ударно-волновое течение и через импульсный нагрев поверхностей стенок. Покадровой съемкой в инфракрасном диапазоне через кварцевые окна камеры зарегистрирована эволюция тепловых полей на диэлектрических поверхностях стенок в разрядной камере. При давлениях от 70 до 290 Торр инициирование сильнооточного наносекундного поверхностного скользящего разряда приводит к существованию теплового пятна длительностью до 30 мс вблизи уступа. Данные о тепловых потоках и ударно-волновых полях от разрядов имеют особое значение на практике, когда плазменные актуаторы используются на поверхностях сложной геометрии в камерах сгорания [1, 16, 17].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-29-00652.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Стариковский А.Ю., Александров Н.Л.* Управление газодинамическими потоками с помощью сверхбыстрого локального нагрева в сильнонеравновесной импульсной плазме // *Физика плазмы*. 2021. Т. 47. № 2. С. 126.
2. *Голуб В.В., Савельев А.С., Сеченов В.А., Сон Э.Е., Терешонок Е.В.* Плазменная аэродинамика в сверхзвуковом потоке газа // *ТВТ*. 2010. Т. 48. № 6. С. 948.
3. *Аксенов В.С., Голуб В.В., Губин С.А., Савельев А.С., Сеченов В.А., Сон Э.Е.* Сверхзвуковое обтекание воздухом профиля крыла при инициировании

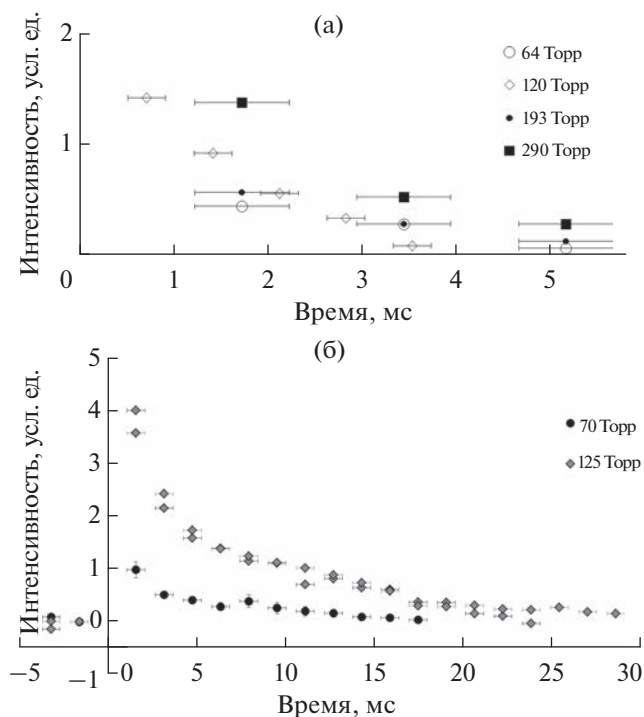


Рис. 6. Зависимость теплового излучения от времени при различных начальных давлениях: (а) — остывание участка верхней стенки канала, (б) — остывание нижней стенки вблизи диэлектрической вставки.

- скользящего разряда на его поверхности // ТВТ. 2010. Т. 48. № 1 (доп.). С. 93.
4. *Pescini E., Francioso L., De Giorgi M.G., Ficarella A.* Investigation of a Micro Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator for Regional Aircraft Active Flow Control // J. IEEE Trans. Plasma Sci. 2015. V. 43. № 10. P. 3668.
 5. *Gilbart B., Dickenson A., Walsh J.L., Hasan M.I.* Dominant Heating Mechanisms in a Surface Barrier Discharge // J. Phys. D: Appl. Phys. 2021. V. 54. P. 175202.
 6. *Казанский П.Н., Климов А.И., Моралев И.А.* Управление воздушным потоком вблизи кругового цилиндра с помощью ВЧ-актюатора. Влияние параметров разряда на аэродинамическое сопротивление цилиндра // ТВТ. 2012. Т. 50. № 3. С. 346.
 7. *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 // J. Phys. D: Appl. Phys. 2019. V. 52. P. 265202.
 8. *Khrantsov P.P., Peniazkov O.G., Grishchenko V.M., Doroshko M.V., Chernik M.Yu., Shikhet I.A.* Diagnostics of Average Temperature Fields and Electron Densities in a Barrier Discharge Plasma in the Presence of Air Flow // J. Eng. Phys. Thermophys. 2009. V. 82. № 6. P. 1146.
 9. *Знаменская И.А., Мурсенкова И.В., Сысоев Н.Н.* Экспериментальные исследования ударно-волновых процессов при импульсной ионизации поверхности канала в ударной трубе // ИФЖ. 2011. Т. 84. № 1. С. 32.
 10. *Баранов В.Ю., Борисов В.М., Высикайло Ф.И., Христоворов О.Б.* Исследование условий формирования однородного сильнооточного скользящего разряда // ТВТ. 1984. Т. 22. № 4. С. 661.
 11. *Mursenkova I.V., Znamenskaya I.A., Lutsky A.E.* Influence of Shock Waves from Plasma Actuators on Transonic and Supersonic Airflow // J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. V. 51. P. 105201.
 12. *Koroteeva E., Znamenskaya I., Orlov D., Sysoev N.* Shock Wave Interaction with a Thermal Layer Produced by a Plasma Sheet Actuator // J. Phys. D: Appl. Phys. 2017. V. 50. № 8. P. 085204.
 13. *Аульченко С.М., Замураев В.П., Знаменская И.А., Калинина А.П., Орлов Д.М., Сысоев Н.Н.* О возможности управления трансзвуковым обтеканием профилей с помощью подвода энергии на основе наносекундного разряда типа “плазменный лист” // ЖТФ. 2009. Т. 79. № 3. С. 17.
 14. *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 // J. Exp. Fluids. 2021. V. 62. № 7. P. 151.
 15. *Ombrello T., Blunck D.L., Resor M.* Quantified Infrared Imaging of Ignition and Combustion in a Supersonic Flow // J. Exp. Fluids. 2016. V. 57. P. 140.
 16. *Esakov I.I., Ravaev A.A., Grachev L.P., Volobuev I.A.* Plasma-Assisted Ignition in the Flow-Through Combustion Chamber // J. Problemele Energeticii Regionale. 2019. V. 3. № 44. P. 66.
 17. *Cai Z., Wang T., Sun M.* Review of Cavity Ignition in Supersonic Flows // J. Acta Astronaut. 2019. V. 165. P. 268.