

Experimental Study of Localization of Pulsed Combined Discharge in a Structured Flow Behind a Shock Wave

D. I. Tatarenkova, I. A. Znamenskaya, T. A. Kuli-zade, N. N. Sysoev

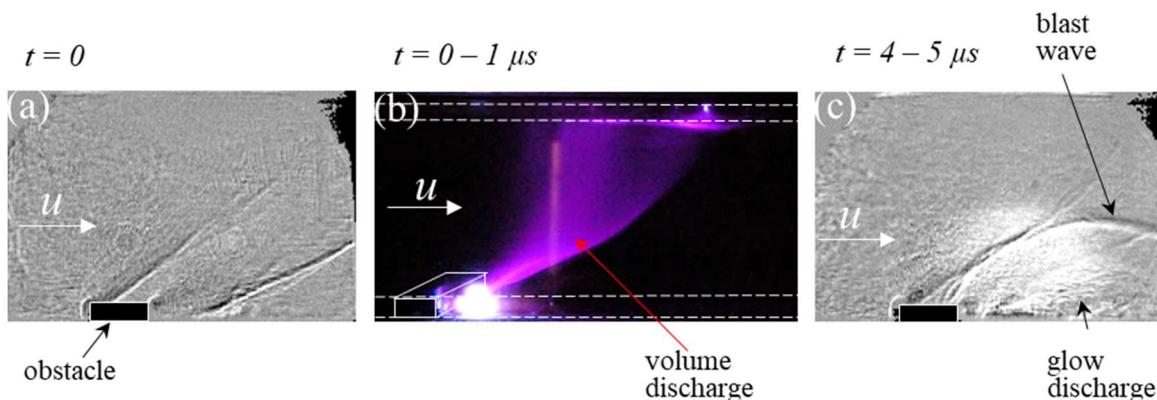
Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University,
Moscow, 119991, Russia

tatarenkova.darya@yandex.ru, znamen@phys.msu.ru

Abstract

In this work, the distribution of a pulsed volume discharge with ultraviolet preionization in a high-speed structured flow within a rectangular channel of a shock tube ($24 \times 48 \text{ mm}^2$) and its effect on the flow have been experimentally investigated. To create a stable gas-dynamic structure, including oblique shock waves and separation zones, a dielectric obstacle ($6 \times 2 \times 48 \text{ mm}^3$) was installed on the wall within the discharge gap. Using high-speed shadow visualization and synchronized recording of the plasma's integral optical radiation, it has been demonstrated that the discharge self-localizes, redistributing according to the instantaneous flow field into spatial plasma channels in a highly non-uniform flow. It has been shown that the primary mechanism of flow modification is shock-wave-based: rapid energy deposition in the localized plasma channels generates directional blast waves with front velocities up to 1200 m/s, which substantially modify the initial gas-dynamic structure. The obtained results demonstrate the possibility of controlled pulsed plasma action on high-speed flows through the targeted self-localization of the discharge in specific flow regions.

Keywords: pulsed volume discharge, plasma self-localization, high-speed flow, discharge visualization, gas-dynamic control.



Gas-dynamic field of supersonic flow behind the shock wave undisturbed by discharge (a), corresponding pattern of integral glow of nanosecond discharge in the flow (b), and shock-wave flow (blast waves) initiated by the discharge (c) in the corresponding flow

533.9, 533.6.011

Экспериментальное исследование локализации импульсного комбинированного разряда в структурированном потоке за ударной волной

Д. И. Татаренкова, И. А. Знаменская, Т. А. Кули-заде, Н. Н. Сысоев

*Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова,
Россия, Москва, 119991, Ленинские горы, д. 1, стр. 2
tatarenkova.darya@yandex.ru, znamen@phys.msu.ru*

Аннотация

В данной работе экспериментально исследовано распределение импульсного объёмного разряда с ультрафиолетовой предионизацией в высокоскоростном структурированном течении в прямоугольном канале ударной трубы $24 \times 48 \text{ mm}^2$ и его воздействие на поток. Для создания стабильной газодинамической структуры, включающей косые скачки уплотнения и зоны отрыва, на стенку в разрядный промежуток установлено диэлектрическое препятствие $6 \times 2 \times 48 \text{ mm}^3$. Методами высокоскоростной теневой визуализации и синхронизированной регистрации интегрального оптического излучения плазмы показано, что разряд, самолокализуется, перераспределяясь в соответствии с мгновенным полем течения в сильно неоднородном потоке в пространственные плазменные каналы. Показано, что основным механизмом воздействия на поток является ударно-волновой: быстрое энерговыделение в локализованных плазменных каналах генерирует направленные взрывные волны со скоростями фронта до 1200 м/с , которые существенно модифицируют исходную газодинамическую структуру. Полученные результаты демонстрируют возможность управляемого импульсного плазменного воздействия на высокоскоростные течения, за счет целенаправленной самолокализации разряда в определенных областях течения.

Ключевые слова: импульсный объемный разряд, самолокализация плазмы, высокоскоростное течение, визуализация разрядом, газодинамическое управление.

1. Введение

Управление высокоскоростными газодинамическими течениями с помощью плазменных воздействий представляет собой одно из перспективных направлений в аэрокосмической науке и технике. Исследования в этой области показывают, что эффективность плазменного воздействия на поток определяется не только величиной энерговложения, но и пространственной конфигурацией при локализации плазмы в потоке. В последние годы активно развиваются подходы к управлению неоднородными плазменными образованиями, способными целенаправленно модифицировать газодинамические структуры в определенных областях течения.

Особое внимание уделяется проблеме пространственной локализации плазмы в условиях высокоскоростного потока. Разрядная зона может располагаться в проблемных областях течений, с целью управления (аэродинамические течения) или в профилированных каналах трактов для эффективного воспламенения [1–3]. Стоит отметить, что важным направлением исследований является изучение взаимодействия разрядной плазмы с ударными волнами и

пограничными слоями [4]. Экспериментальные исследования показывают, что как субмикросекундные, так и разряды постоянного тока в неоднородном сверхзвуковом потоке могут не распределяться равномерно, а склоны к локализации в определенных зонах в зависимости от локальных параметров потока [5, 6]. Как показано в работе [5], даже в условиях относительно простых геометрий разряд имеет тенденцию к концентрации в прикатодных областях или в зонах с определенными градиентами скорости. При наличии геометрических неоднородностей или искусственно созданных препятствий пространственное распределение плазмы становится еще более сложным, что открывает возможности для целенаправленного управления локализацией разряда [6].

Значительные результаты достигнуты в формировании управляемой пространственной структуры плазмы и получены при использовании комбинированных воздействий. В работе [7] исследовался СВЧ-разряд с безыскровой лазерной инициацией в сверхзвуковом потоке, что позволило достичь протяженных нагретых областей с контролируемой геометрией для модификации ударных волн. Экспериментальные результаты показали, что такие технологии обеспечивают возможность создания локализованных плазменных областей в заданных точках потока, что существенно повышает эффективность воздействия на газодинамические структуры.

Особый интерес представляет изучение механизмов самолокализации разряда в условиях сильно неоднородного потока. Как отмечается в [8, 9, 10], взаимодействие ударных волн с геометрическими неоднородностями создает сложную картину градиентов скорости, давления и плотности, которые могут служить естественными областями пониженной плотности куда локализируется импульсная плазма, становясь «ловушками». В таких условиях разряд может концентрироваться в критических зонах течения, таких, как области отрыва пограничного слоя или зоны взаимодействия ударных волн, что позволяет значительно повысить эффективность управления потоком по сравнению с однородным распределением плазмы.

Несмотря на значительные результаты исследований в области управления пространственной структурой плазмы, остаются недостаточно изученными особенности распределения импульсного объемного разряда в сильно неоднородных высокоскоростных течениях. Известно, что в однородных средах разряд распределяется относительно равномерно, тогда как в неоднородных потоках могут наблюдаться эффекты самолокализации [6]. При этом механизмы формирования пространственных плазменных структур в условиях сверхзвукового обтекания, а также их динамическое взаимодействие с ударно-волновыми конфигурациями требуют дальнейшего изучения [11].

После пространственной локализации плазмы, следующее на что следует обратить внимание – это механизм энерговложения в поток [12, 13]. Современные подходы к плазменному управлению потоками можно классифицировать по типам разрядов: электродные разряды (импульсные, тлеющие), СВЧ-разряды и лазерные искры [1, 6, 7, 14]. Исследования последних лет показали, что эффективность плазменного воздействия напрямую зависит от геометрии энерговыделения, временных параметров импульса, а также степени неравновесности плазмы [2, 13, 15]. В частности, в работе [13] продемонстрировано, что увеличение степени неравновесности газоразрядной плазмы приводит к нелинейному возрастанию эффекта воздействия на параметры обтекания, что обусловлено комплексным влиянием как тепловых, так и плазменно-химических механизмов.

В работах [8, 16] показано, что инфракрасная термография и теневые методы визуализации позволяют установить взаимосвязь между газодинамическими и тепловыми процессами при нестационарном обтекании тел. При этом особое значение придается анализу ударно-волновых процессов, генерируемых локальным энерговыделением в плазме [13, 16, 17].

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования распределения импульсного объемного разряда с ультрафиолетовой предионизацией в структурированном сверхзвуковом потоке. Особое внимание уделено пространственной локализации разряда в условиях неоднородного течения и возможности управляемой локализации плазменных областей в различных зонах течения.

2. Постановка эксперимента

Эксперименты проведены на однодиафрагменной ударной трубе УТРО-3 (рис. 1), предназначеннной, в частности, для исследования взаимодействия импульсных разрядов с нестационарным высокоскоростным потоком. Установка состоит из камеры высокого давления, заполняемой гелием до $5 \div 9$ атм и камеры низкого давления (канала) прямоугольного сечения $24 \times 48 \text{ мм}^2$ длиной 3130 мм, откуда воздух откачивается до $10 \div 30$ торр. В канал встроен рабочий участок (протяженностью 335 мм), который расположен в канале на расстоянии 2100 мм от диафрагмы и оснащен кварцевыми окнами протяженностью 197 мм для оптической диагностики внутренних течений. Диафрагма, установленная между секциями, при критическом перепаде давлений разрывается, что инициирует ударную волну с числом Маха от 2 до 4 (диапазон в рамках данного исследования) и высокоскоростной поток за ней [18]. Параметры квазистационарного потока воздуха рассчитываются по соотношениям Ренкина-Гюгонио.

В разрядной секции (рабочий участок) реализуется импульсный комбинированный разряд с ультрафиолетовой предионизацией от плазменных листов. Предионизация осуществляется скользящими разрядами, создающими плазменные листы протяженностью 100 мм и шириной 30 мм с плотностью электронов $n_e \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ преимущественно в УФ-диапазоне ($200 \div 400$ нм). Основной энерговклад производится от конденсатора ёмкостью 2300 пФ, заряжаемого до напряжения $20 \div 30$ кВ. Временные параметры разряда включают фазу предионизации плазменными листами ($\tau_{pre} < 70$ нс) и основную фазу объемного разряда ($\tau_{main} = 150 \div 200$ нс) с пиковым током I_{\max} до 1.2 кА. Приведённое электрическое поле в промежутке составляет $E/N \approx 200 \div 1000$ Тд [19].

С целью исследования механизмов воздействия на газодинамические структуры в сверхзвуковом потоке использовалось диэлектрическое препятствие ($2 \times 48 \times 6 \text{ мм}^3$), установленное в области разрядного промежутка (рис. 1). Со стороны газодинамики его обтекание приводило к формированию структурированного течения с системой скачков уплотнения и отрывных зон.

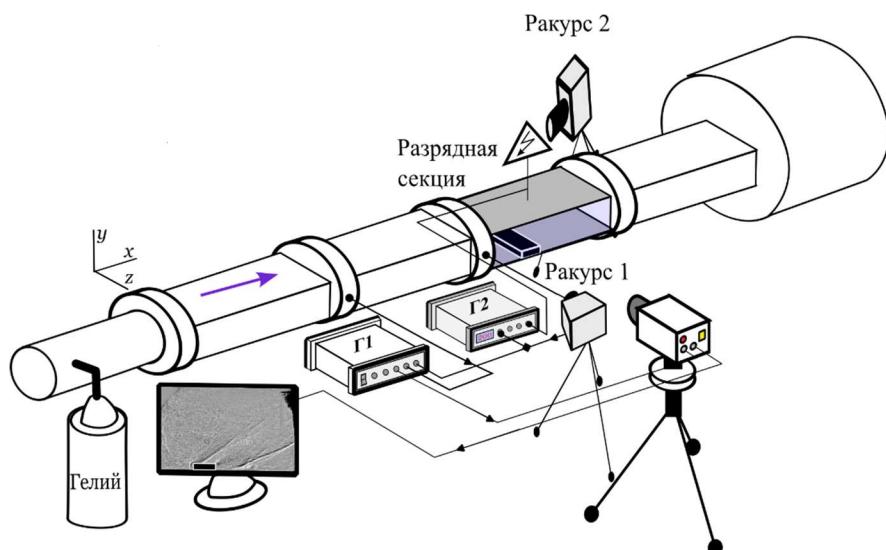


Рис. 1. Схема установки с диагностическим комплексом – ударная труба и две фотокамеры (2 ракурса), высокоскоростная камера Photron SA5

Импульсный разряд с наносекундным фронтом нарастания тока сопровождается быстрым (за время менее 1 мкс) повышением температуры и давления в зоне разряда, что обусловлено высоким значением вложенной в газ энергии в ограниченной области. В эту область поступает около 1 Дж энергии, что приводит к мгновенному повышению давления, температуры, энталпии. Импульсный разряд может существенно изменять высокоскоростное течение в газодинамическом канале [6]. Локализация наносекундного разряда, инициируемого в сверхзвуковом течении за ударной волной, сильно зависит от мгновенного поля плотности тестируемого течения в разрядном (рабочем) промежутке. В работе [6] показано, что при разных режимах обтекания импульсный разряд перераспределяется вблизи препятствия согласно мгновенному полю течения, а его локализация меняется в зависимости от изменения скорости течения – от сверхзвуковой к дозвуковой. Интенсифицированные плазменные каналы, наблюдаемые, вблизи вставки, становятся источниками возмущений. Мгновенный ввод энергии приводит к скачкообразному увеличению давления, что способно существенно изменить высокоскоростное течение в газодинамическом канале.

Импульсный разряд инициировался на различных участках газодинамического течения за ударной волной. Инициирование импульсного разряда достигалось изменением временной задержки на генераторе между запускающим сигналом, поступающим от пьезодатчика давления, и моментом инициирования разряда.

Локализация наносекундного разряда в потоке определялась на основе интегральной регистрации свечения с двух ракурсов (см. рис. 1). Диагностика газодинамического течения в канале осуществлялась высокоскоростной камерой Photron SA5 (скорость регистрации – 150000 кадров в секунду, экспозиция 1 мкс) с лазерной подсветкой ($\lambda = 532$ нм). Синхронизация наносекундного разряда с микросекундными газодинамическими процессами позволяет исследовать влияние на структуру течения.

3. Результаты экспериментов

Экспериментальные исследования показали, что при инициировании импульсного объемного разряда с ультрафиолетовой предионизацией (ИОР) в нестационарном высокоскоростном потоке за ударной волной наблюдается корреляция мгновенной структуры течения (рис. 2, *a*) при перераспределении свечения плазмы (рис. 2, *b*, *c*). Интегральная регистрация свечения ИОР в видимом диапазоне для чисел Маха ударной волны $M_{ув} = 2.0 \div 4.0$ продемонстрировала хорошую повторяемость пространственного распределения плазмы, которое однозначно коррелирует с газодинамическим полем, зафиксированным методами высокоскоростной теневой визуализации.

В сверхзвуковом режиме обтекания, когда поток в ударной трубе представляет собой воздушную пробку сжатого газа, объемная фаза разрядной плазмы концентрируется в область пространственных скачков, визуализируя форму конфигураций косого скачка уплотнения и веера Прандтля-Мейера.

Поверхностная плазма скользящего разряда на нижней стенке стягивается в коротко-живущий высокоэнергетичный плазменный канал длиной ~ 30 мм. Этот канал формируется в приповерхностном межэлектродном зазоре поперек потока, вдоль задней кромки препятствия, преимущественно стягиваясь с участка нижнего плазменного листа. Такая локализация в подветренной области непосредственно обусловлена наличием зоны отрывного течения с естественно низкой плотностью.

При снижении скорости потока и переходе к трансзвуковым режимам картина локализации существенно меняется. Пространственные неоднородности плотности в межэлектродном объеме (рис. 2, *d*) приводят к стягиванию разряда в каналы по объему или по боковым стеклянным поверхностям, визуализируя структуру пограничного слоя (рис. 2, *e*, *ж*). Изменение поля обтекания препятствия вызывает формирование двух отдельных плазменных каналов нитевидной формы. Первый канал локализуется в подветренной зоне отрыва, а второй – на наветренной стороне, вдоль передней кромки препятствия. Таким образом, локализация

наносекундного разряда и количество плазменных каналов напрямую определяются текущей конфигурацией течения и наличием зон с пониженной плотностью во всем межэлектродном зазоре.

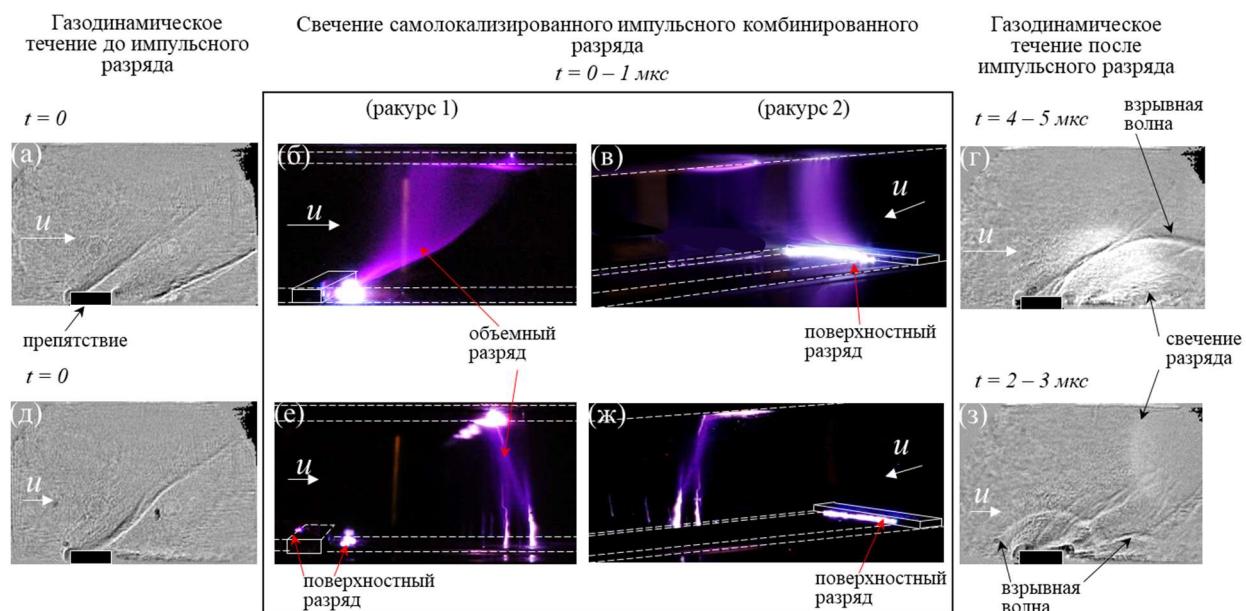


Рис. 2. Газодинамическое поле течения за ударной волной – сверхзвуковое (а) и трансзвуковое (д), соответствующая картина интегрального свечения наносекундного разряда в потоке с двух ракурсов (б–в) и (е–ж) и ударно-волновое течение (взрывные волны) от разряда (г) и (з) в соответствующем потоке

Наносекундный разряд способен к аддитивной самолокализации в областях с минимальной плотностью газа: зоны отрыва перед препятствием или за ним, области разрежения перед фронтом ударной волны. В результате разряд не распределяется равномерно по объему, а концентрируется, формируя интенсивные плазменные каналы. Это приводит к резкому увеличению удельного энерговклада в данных областях локализации, который может на порядок превышать средний по объему. Именно эти области становятся мощными источниками направленных ударных возмущений.

Экспериментально было получено, что генерируемые разрядом взрывные волны обладают высокой начальной скоростью фронта, достигающей 1200 м/с в направлении, перпендикулярном основному потоку (см. рис. 2, г – при сверхзвуковом потоке; рис. 2, з – при трансзвуковом потоке). Пространственная конфигурация этих волн является полуцилиндрической и однозначно определяется локализацией плазмы вблизи препятствия.

Была получена зависимость временных характеристик воздействия взрывных волн от импульсного разряда на поток от его скорости. Установлено, что длительность ударно-волнового возмущения, то есть время, за которое исходная структура течения восстанавливается после энерговклада, обратно пропорциональна скорости потока (рис. 3). В сверхзвуковом потоке (скорость потока 900 м/с) это время составляет $20 \div 30 \text{ мкс}$, тогда как при снижении скорости до дозвуковых значений длительность воздействия возрастает до $120 \div 130 \text{ мкс}$ (при 200 м/с). При полной остановке потока длительность ударно-волнового процесса может достигать 600 мкс. Инерция высокоскоростного потока активно противодействует развитию возмущения, быстро «вымывая» разогретую область и восстанавливая картину установившегося обтекания.

Взаимодействие взрывных волн с элементами структурированного течения имеет сложный характер. Наблюдается слияние фронтов взрывных волн с стационарными скачками уплотнения, их отражение от стенок канала и контактных поверхностей, что приводит к врем-

менному изменению конфигурации всего течения в окрестности препятствия. Таким образом, ударно-волновой механизм позволяет не локальное (точечное) воздействие, а интегральное перестроение поля течения в области, значительно превышающей размеры исходного плазменного образования (энергоподвода).

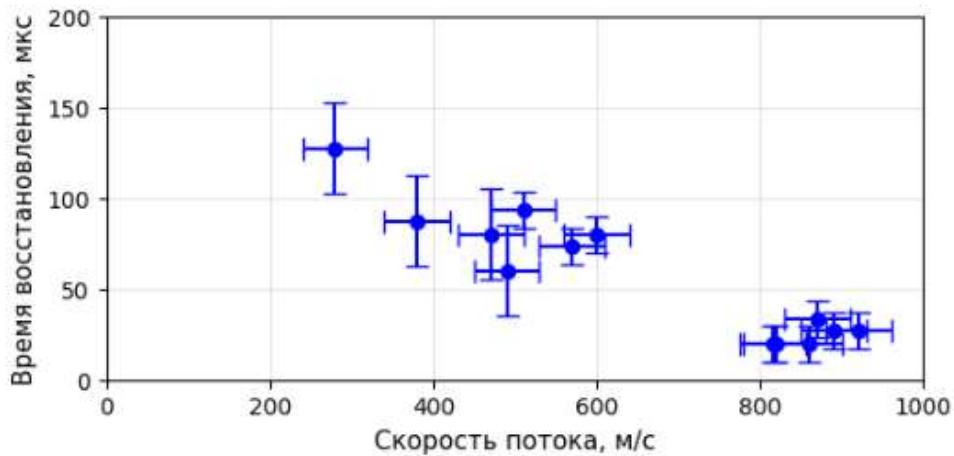


Рис. 3. Зависимость длительности восстановления течения после воздействия импульсного объемного разряда в зависимости от скорости набегающего потока

4. Заключение

Экспериментально показано, что импульсный объемный разряд с УФ-предыонизацией в нестационарном высокоскоростном потоке в канале с препятствием не распределяется однородно, а самолокализуется согласно полю течению. Пространственное распределение плазмы однозначно коррелирует с мгновенной газодинамической структурой течения, концентрируясь преимущественно в областях с пониженной плотностью (зоны отрыва, области разрежения).

В сильно неоднородном потоке разряд стягивается в высокоэнергетичные плазменные каналы вдоль поверхностей. Локализация этих каналов напрямую определяются режимом обтекания (сверхзвуковое, трансзвуковое) и наличием диэлектрического препятствия.

Показано, что установленное препятствие позволяет контролировать локализацию импульсного разряда.

Основным механизмом влияния разряда на поток является ударно-волновой. Быстрый (субмикросекундной длительности) энерговклад в локализованных каналах генерирует направленные взрывные волны со скоростью фронта до 1200 м/с. Их пространственная конфигурация (полуцилиндрическая) однозначно определяется областью локализации плазмы.

Взаимодействие взрывных волн с квазистационарными скачками уплотнения приводит к перестройке поля течения в области, значительно превышающей размеры исходного плазменного канала. Это демонстрирует возможность управляемого импульсного воздействия для модификации сложных газодинамических структур.

Благодарности и ссылки на гранты

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках гранта №24-79-00029 «Воздействие наносекундного объемного разряда на нестационарное высокоскоростное газодинамическое течение».

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература

1. Суржиков С. Т. Диффузионно-дрейфовая модель поверхностного тлеющего разряда в сверхзвуковом потоке газа // Изв. РАН. МЖГ. 2024. № 1. С. 145–162. DOI: 10.31857/S1024708424010119
2. Leonov S., Yarantsev D. Plasma-induced ignition and plasma-assisted combustion in high-speed flow // Plasma Sources Science and Technology. 2007. Vol. 16. No. 1. Pp. 132–138. DOI:10.1088/0963-0252/16/1/018
3. Gan T., Wang Q., Gan W., Jieming Z. Visualization study of perturbations induced by plasma actuators and its effect on shock wave/boundary-layer interaction // Journal of Visualization. 2022. Vol. 26. No. 3. Pp. 517–528. DOI:10.1007/s12650-022-00897-w
4. Znamenskaya I., Koroteev D., Lutsky A. Discontinuity breakdown on shock wave interaction with nanosecond discharge // Physics of Fluids. 2008. Vol. 20. P. 056101. DOI:10.1063/1.2908010
5. Руслева Л. Б., Соловьевников С. И. Экспериментальные исследования тлеющего разряда на плоских электродах в потоке // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2025. Т. 26, вып. 1, <http://chemphys.edu.ru/issues/2025-26-1/articles/1165/>
6. Znamenskaya I. A., Lutsky A. E., Tatarenkova D. I., Karnosova E. A., Sysoev N. N. Nanosecond volume discharge in the non-stationary high-speed profiled channel flow // Physics of Fluids. 2023. Vol. 35. P. 076110. DOI: 10.1063/5.0153624
7. Абакарова М. А., Добров Ю. В., Кравченко Д. С., Лашков В. А., Машек И. Ч., Ренев М. Е., Хоронжук Р. С. СВЧ-разряд с безыскровой лазерной инициацией в сверхзвуковом потоке и влияние его следа на обтекание тел // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2025. Т. 26, вып. 4. <http://chemphys.edu.ru/issues/2025-26-4/articles/1189/>
8. Знаменская И. А., Муратов М. И., Карнозова Е. А., Сысоев Н. Н., Богданова М. А. Эволюция тепловых полей на обтекаемой поверхности, нагретой ударной волной и плазмой импульсного поверхностного разряда // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2024. Т. 25, вып. 6. <http://chemphys.edu.ru/issues/2024-25-6/articles/1150/>
9. Иванова А. А., Мурсенкова И. В. Экспериментальное исследование движения ударной волны в плазме импульсного объемного разряда в воздухе // Вестник МГУ. Серия 3: Физика, астрономия. 2023. Т. 2. DOI: 10.55959/MSU0579-9392.78.2320601
10. Znamenskaya I. A., Dolbnya D. I., Ivanov I. E., Kuli-zade T. A., Sysoev N. N. Pulse volume discharge behind shock wave in channel flow with obstacle // Acta Astronautica. 2022. Vol. 195. Pp. 493–501. DOI: 10.1016/j.actaastro.2022.03.031
11. Соловьевников С. И., Руслева Л. Б. Экспериментальные исследования газоразрядной плазмы в потоке воздуха // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2023. Т. 24. № 6. DOI: 10.33257/PhChGD.24.6.1079
12. Азарова О., Ерофеев А., Лапушкина Т. Сравнение плазменного и теплового воздействий на сверхзвуковое обтекание аэродинамического тела // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. № 8. DOI: 10.21883/PJTF.2017.08.44540.16598
13. Azarova O., Kravchenko O. The use of spatially multi-component plasma structures and combined energy deposition for high-speed flow control: a selective review // Energies. 2024. Vol. 17. P. 1632. DOI: 10.3390/en17071632
14. Зудов В., Тупикин А. Влияние внешнего электрического поля на оптический разряд в скоростном потоке // Журнал технической физики. 2022. Т. 92. № 2. С. 209–215. DOI: 10.21883/jtf.2022.02.52009.244-21
15. Старицкий А., Александров Н. Управление газодинамическими потоками с помощью сверхбыстрого локального нагрева в сильнонеравновесной импульсной плазме // Низкотемпературная плазма. 2021. Т. 47. № 2. С. 126-192. DOI: 10.31857/S0367292121020062

16. Знаменская И. А., Карнозова Е. А. Динамика тепловых полей на обтекаемой поверхности, нагретой ударной волной и импульсным разрядом // Журнал технической физики. 2024. Т. 94. № 6. С. 849–856. DOI: 10.61011/JTF.2024.06.58125.45-24
17. Tatarenkova D. I., Koroteeva E. Y., Kuli-zade T. A., Karnozova E. A., Znamenskaya I. A., Sysoev N. N. Pulsed discharge-induced high-speed flow near a dielectric ledge // Experiments in Fluids. 2021. Vol. 62. No. 7. P. 151. DOI: 10.1007/s00348-021-03253-0
18. Долбня Д. И., Дорощенко И. А., Знаменская И. А., Муратов М. И. Новые подходы к визуализации и анализу течений в ударных трубах // Вестник МГУ. Серия 3: Физика. Астрономия. 2025. Т. 80. № 3. С. 2531001. DOI: 10.55959/MSU0579-9392.80.2531001
19. Архипов Н. О., Знаменская И. А., Мурсенкова И. В., Остапенко И. Ю., Сысоев Н. Н. Эволюция наносекундного комбинированного объемного разряда с плазменными электродами в потоке воздуха // Вестник МГУ. Серия 3: Физика. Астрономия. 2014. Т. 1. С. 88–95.

References

1. Surzhikov S. T., Diffusion-drift model of the surface glow discharge in supersonic gas flow, *Fluid Dynamics*, 2024, vol. 59, no. 1, pp. 145–168. DOI: 10.1134/s0015462823602346
2. Leonov S., Yarantsev D., Plasma-induced ignition and plasma-assisted combustion in high-speed flow, *Plasma Sources Science and Technology*, 2007, vol. 16, no. 1, pp. 132–138. DOI: 10.1088/0963-0252/16/1/018
3. Gan T., Wang Q., Gan W., Jieming Z., Visualization study of perturbations induced by plasma actuators and its effect on shock wave/boundary-layer interaction, *Journal of Visualization*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 517–528. DOI: 10.1007/s12650-022-00897-w
4. Znamenskaya I., Koroteev D., Lutsky A., Discontinuity breakdown on shock wave interaction with nanosecond discharge, *Physics of Fluids*, 2008, vol. 20, p. 056101. DOI: 10.1063/1.2908010
5. Ruleva L. B., Solodovnikov S. I., Experimental studies of glow discharge on the flat electrodes in the flow, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2025, vol. 26, issue 1 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/Issues/2025-26-1/articles/1165>
6. Znamenskaya I. A., Lutsky A. E., Tatarenkova D. I., Karnosova E. A., Sysoev N. N., Nanosecond volume discharge in the non-stationary high-speed profiled channel flow, *Physics of Fluids*, 2023, vol. 35, p. 076110. DOI: 10.1063/5.0153624
7. Abakarova M. A., Dobrov Yu. V., Kravchenko D. S., Lashkov V. A., Mashek I. Ch., Renev M. E., Khoronzhuk R. S., Microwave discharge with sparkless laser initiation in supersonic flow and the influence of its trace on body aerodynamic, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2025, vol. 26, iss. 4 [in Russian]. DOI: 10.33257/PhChGD.26.4.1189
8. Znamenskaya I. A., Muratov M. I., Karnozova E. A., Sysoev N. N., Bogdanova M. A., Evolution of thermal fields on a streamlined surface heated by a shock wave and plasma of a pulsed surface discharge, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2024, T. 25, вып. 6. [in Russian]. DOI: 10.33257/PhChGD.25.6.1150
9. Ivanova A. A., Mursenkova I. V., Experimental study of the motion of a shock wave in the plasma of a pulsed volume discharge in air, *Moscow University Physics Bulletin*, 2023, vol. 78, issue 2, pp. 204–213. DOI: 10.3103/S0027134923020066
10. Znamenskaya I. A., Dolbnya D. I., Ivanov I. E., Kuli-zade T. A., Sysoev N. N., Pulse volume discharge behind shock wave in channel flow with obstacle, *Acta Astronautica*, 2022, vol. 195, pp. 493–501. DOI: 10.1016/j.actaastro.2022.03.031
11. Solodovnikov S. I., Ruleva L. B., Experimental studies of gas-discharge plasma in a stream, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2023, vol. 24, issue 6. [in Russian]. DOI: 10.33257/PhChGD.24.6.1079

12. Azarova O., Erofeev A., Lapushkina T., A comparison of plasma and thermal effects upon supersonic flow past aerodynamic bodies, *Technical Physics Letters*, 2017, vol. 43, no. 4, pp. 405–408. DOI: 10.1134/S1063785017040150
13. Azarova O., Kravchenko O., The use of spatially multi-component plasma structures and combined energy deposition for high-speed flow control: a selective review, *Energies*, 2024, vol. 17, p. 1632. DOI: 10.3390/en17071632
14. Zudov V., Tupikin A., Influence of external electric field on optical breakdown in high-speed flow, *Tech. Phys.*, 2022, vol. 68, pp. 315–321. DOI: 10.1134/S106378422390019X
15. Starikovskiy A. Y., Aleksandrov N. L., Gasdynamic flow control by ultrafast local heating in a strongly nonequilibrium pulsed plasma, *Plasma Phys. Rep.*, 2021, vol. 47, pp. 148–209. DOI: 10.1134/S1063780X21020069
16. Znamenskaya I. A., Karnozova E. A., Thermal fields dynamics on a streamlined surface heated by a shock wave and a pulsed discharge, *Technical Physics*, 2024, vol. 69, no. 6, pp. 790–796. DOI: 10.61011/TP.2024.06.58820.45-24
17. Tatarenkova D. I., Koroteeva E. Y., Kuli-zade T. A., Karnozova E. A., Znamenskaya I. A., Sysoev N. N., Pulsed discharge-induced high-speed flow near a dielectric ledge, *Experiments in Fluids*, 2021, vol. 62, no. 7, P. 151. DOI: 10.1007/s00348-021-03253-0
18. Dolbnia D. I., Doroshchenko I. A., Znamenskaya I. A., New Approaches to Visualization and Analysis of Flows in Shock Tubes, *Moscow University Physics Bulletin*, 2025, vol. 80, no. 3, pp. 625–632. DOI: 10.3103/S0027134925700596
19. Arkhipov N. O., Znamenskaya I. A., Mursenkova I. V., Ostapenko I. Y., Sysoev N. N., Development of nanosecond combined volume discharge with plasma electrodes in an air flow., *Moscow University Physics Bulletin*, 2014, vol. 69, pp. 96–103. DOI: 10.3103/S0027134914010020

Статья поступила в редакцию 26 декабря 2025 г.