

Experimental Studies of Glow Discharge on the Flat Electrodes in the Air Flow

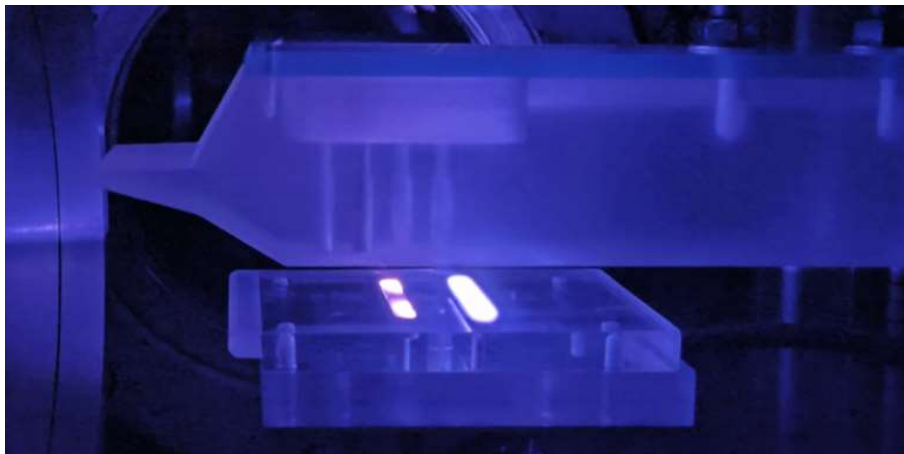
L. B. Ruleva, S. I. Solodovnikov

*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences
Moscow, 119526, Russia
ruleva@ipmnet.ru*

Abstract

Experimental studies of the interaction of a glow discharge on a flat plate with an air flow in a diaphragmless shock aerodynamic tube have been carried out. A longer burning of the discharge on a flat plate has been revealed compared to the opposite directional electrodes. The effect of magnetic induction on plasma luminescence and flow parameters is shown. Video frames of the discharge are shown.

Keywords: glow discharge, plate, flat electrodes, magnet, experiment,



The glow discharge on flat electrodes

УДК 533.6.071.3

Экспериментальные исследования тлеющего разряда на плоских электродах в воздушном потоке

Л. Б. Рулева, С. И. Солодовников

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН
Россия, Москва, 119526, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1*

ruleva@ipmnet.ru

Аннотация

Проведены экспериментальные исследования взаимодействия тлеющего разряда на плоской пластине с воздушным потоком в бездиафрагменной ударной аэродинамической трубе. Выявлено более длительное горение разряда на плоской пластине по сравнению со встречными направленными электродами. Показано влияние магнитной индукции на свечение плазмы и параметры потока. Приведены видеокдры разряда.

Ключевые слова: тлеющий разряд, пластина, плоские электроды, магнит, эксперимент.

1. Введение

Исследования влияния разрядной плазмы на скоростной набегающий поток имеют практическое применение. [1–5]. Например, в работах [5, 6] показано изменение скорости потока и локальных мест нагрева поверхности при применении наносекундного разряда высокого энерговыклада. В работе [7] экспериментально выявлено влияние на скорость потока маломощного нормального тлеющего разряда на встречных электродах в потоке при числах Маха $M = 2.9$.

Расчетные исследования тлеющего маломощного разряда на поверхности обтекаемой газом пластины [8, 9] показали, что с приложением магнитного поля поперек газового потока, можно либо прижимать воздушный поток к пластине, увеличивая конвективный тепловой поток, либо снижать его, изменяя направление магнитной индукции.

В настоящей работе проведены экспериментальные исследования в развитии экспериментов по тлеющему разряду [7], но на плоской пластине, и по подтверждению выводов о влиянии магнитной индукции на тлеющий разряд и на газовый поток расчетной работы [8].

2. Модель в экспериментальной установке

В аэродинамическом блоке бездиафрагменной ударной аэродинамической трубы с сопловым клапаном [10] была установлена модель плоского канала, образованная полуклином и плоской затупленной пластиной. На поверхности пластины, заподлицо с ней, были размещены плоские латунные электроды: анод и катод; длиной 50 мм, шириной 5 мм на расстоянии 15 мм друг от друга. Один из электродов, катод, был расположен ближе к соплу. В некоторых экспериментах между электродами встраивался неодимовый магнит, диаметром 5 мм с индукцией 1.2 Тл. На электроды подавалось питание до 2.6 кВ, при этом ток изменялся от 1 мА до 7 мА. Между электродами зажигался тлеющий разряд постоянного тока. На пластину, по направлению от катода к аноду набегал воздушный поток на числах Маха от $M = 2,9$ [7]. Магнитная индукция \vec{B} была направлена вдоль длины электродов и поперек набегающему потоку. Свечение разряда регистрировалось фотоэлектронным множителем (ФЭУ).

Ток и напряжение в разрядном промежутке снимались с шунта 75 Ом и балластного сопротивления 300 кОм, соответственно. В поток, за пластиной с разрядом, была установлена пластина с датчиками давления и теплового потока из экспериментов [7], сигналы которых использовались в нормированном виде для их сравнений при различных режимах течений и одинаковом временном промежутке. Схема и фото пластины с плоскими электродами, а также электрическая схема, показаны на рис. 1.

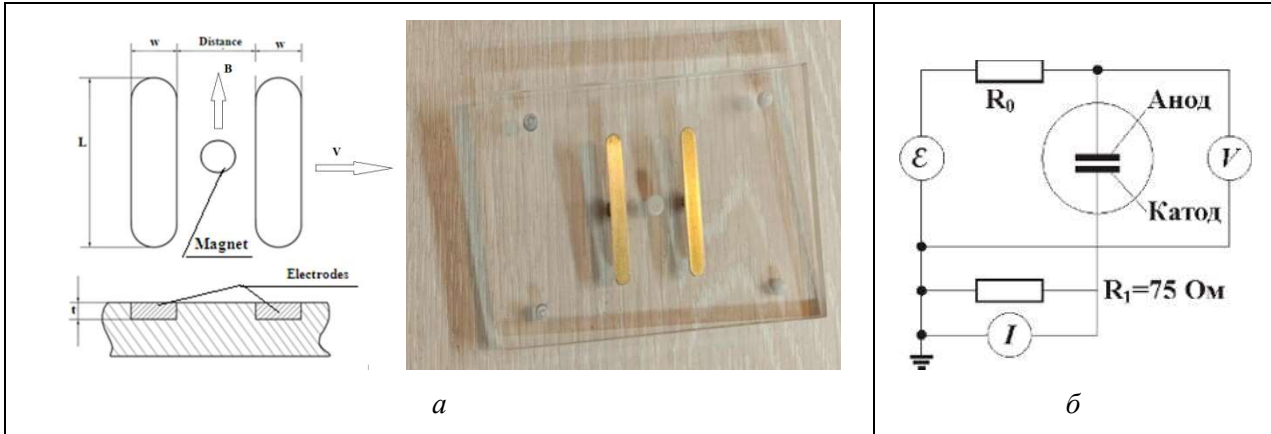


Рис. 1. Схема и фото пластины с плоскими электродами (а), электрическая схема разряда (б)

Электрические сигналы по току и напряжению, а также сигналы датчиков оцифровывались аналого–цифровым преобразователем (АЦП), частотой 10 МГц и отображались с помощью программы Powergraph с шагом 0.4 мкс. Все эксперименты выполнены при давлении среды в аэродинамическом блоке 3.7 торр, максимальном напряжении питания 2600 мВ, токе 7 мА. Ударно-волновые структуры у поверхности модели регистрировались видеокамерой со скоростью 3700 кадров/с. Свечение разряда снималось на видеокамеру при 60 кадров/с. Истечение из сопла инициировалось ударной волной при тестовых режимах [11, 12].

3. Результаты экспериментов

3.1. Исследование параметров разряда без магнита

В разрядном промежутке, при снижении тока от 7 мА до 2 мА, напряжение разрядного промежутка сохраняло свое минимальное значение, что свидетельствовало о существовании нормального тлеющего разряда [7].

Получены вольтамперные характеристики разряда в диапазоне питающего напряжения 830 ÷ 2600 В и токе в диапазоне 1 ÷ 7 мА, графики которых показаны на рис. 2.



Рис. 2. ВАХ разряда на плоской пластине

В начале истечения потока на плоской пластине наблюдался квазистационарный участок, который затем сменялся аномальным разрядом. Картина тлеющего разряда в потоке представлена на графике рис. 3. при $P_4/P_1 = 150$ отн.ед, где P_4 – давление в камере высокого давления, P_1 – давление в канале низкого давления ударной трубы установки.

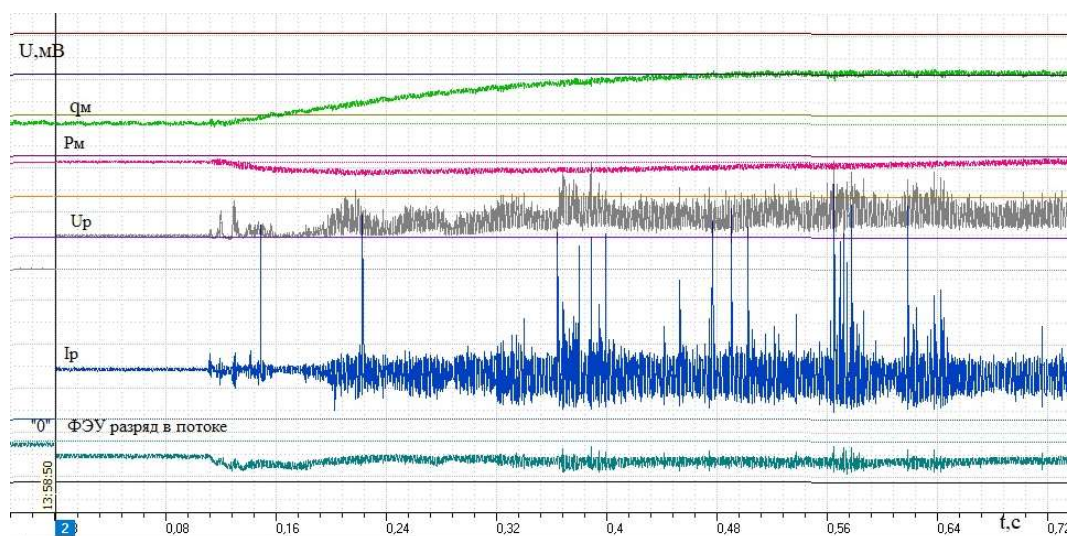


Рис. 3. Графики датчиков при $P_4/P_1 = 150$ отн.ед.

Здесь введены обозначения: ФЭУ – фотоэлектронный умножитель; I_p, U_p – ток и напряжение в разрядном промежутке; q_M, P_M – тепловой поток и давление по потоку. В первом блоке рис. 3 сигналы датчиков до срабатывания сопла, и втором блоке – сигналы датчиков при срабатывании сопла, когда на разряд истекает поток воздуха.

Процесс развития свечения разряда показан на графике ФЭУ. При истечении потока из сопла свечение более яркое, равномерное и продолжительное. Было замечено, что горение разряда в потоке на плоских электродах длилось, не менее 1000 мс.

В начальном истечении из сопла бездиафрагменной установки с сопловым клапаном [10] наблюдалась способность газоразрядной плазмы самоорганизоваться: напряжение разрядного промежутка несколько раз показывало квазистационарное состояние или нормальный тлеющий разряд. На рис. 4 приведена начальная фаза рис. 3, при взаимодействии воздушного потока с зажженным разрядом.

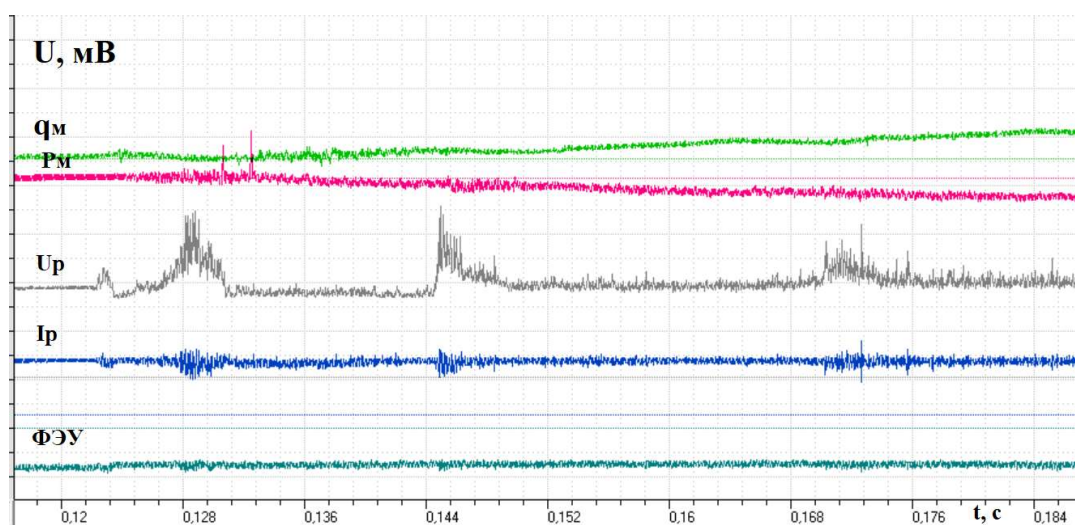


Рис. 4. Начальная фаза взаимодействия воздушного потока с разрядом $P_4/P_1 = 150$ отн.ед.

Тепловой поток на поверхности модели q_M возрастал как результат нагрева от разряда и нагрева поверхности потоком. Давление P_M в потоке снижается.

Свечение разряда без магнита показано на рис. 5, а при напряжении питания 2 кВ и токе 5 мА и на рис. 5, б при напряжении питания 1.78 кВ и токе 4 мА, в разные моменты времени.

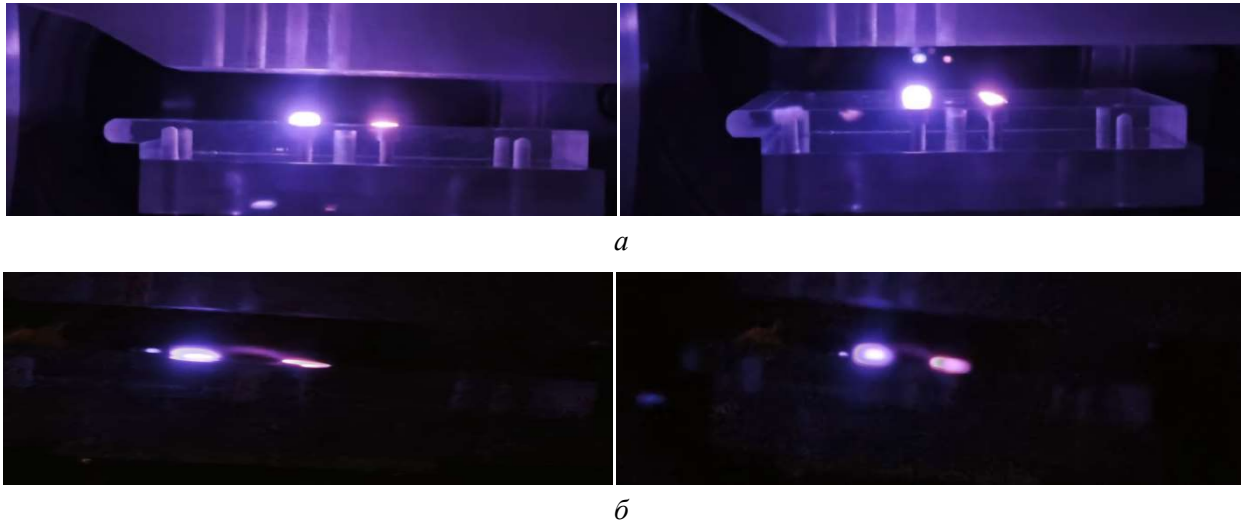


Рис. 5. а – разряд при 2 кВ и 5 мА; б – разряд при 1.78 кВ и 4 мА

Кадры видеосъемки свидетельствуют, что разряд локализовался в прикатодной области. Его яркое свечение свидетельствует, что температура в прикатодной области выше, чем у анода. При более высоком напряжении питания разряд светился ярче.

3.2. Исследование параметров разряда при магнитной индукции $+\bar{B}$

При применении магнита, картина течений изменилась. Когда вектор магнитной индукции $+\bar{B}$ был направлен, как показано на рис. 1, а, графики датчиков при $P_4/P_1 = 150$ отн.ед., приведенные на рис. 6, показали более возмущенное состояние.

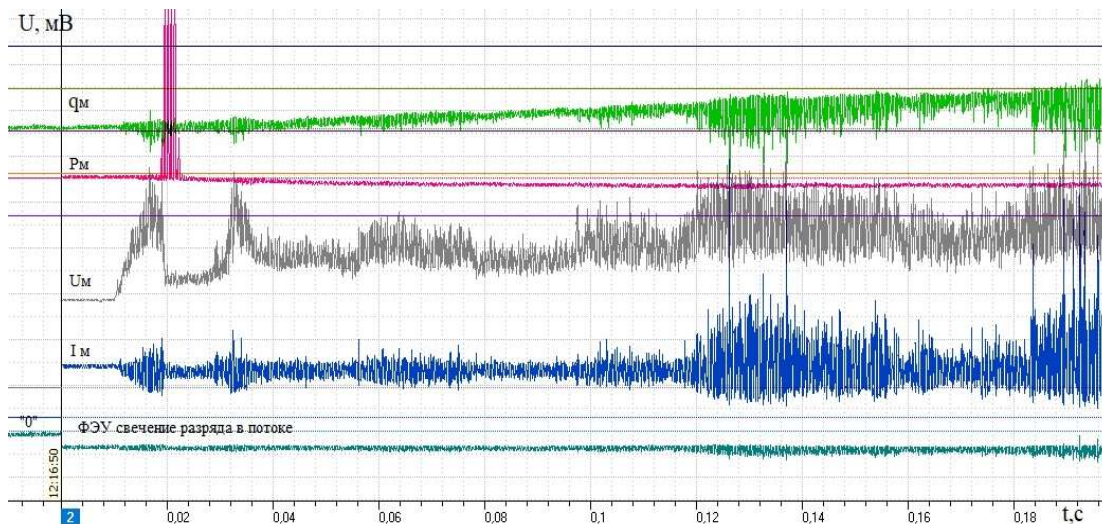


Рис. 6. Графики датчиков при $P_4/P_1 = 150$ отн.ед. Индукция $+\bar{B}$

Тепловой поток и ток разрядного промежутка увеличены. Аномальный тлеющий разряд в развитии становится неустойчивым, амплитуда выходит за рамки возможности измерения.

На видеокдрах формирования разряда видно, что разряд занимает всю поверхность катода. На рис. 7 показана нарезка кадров видеофильма этого явления при $P_4/P_1 = 150$.

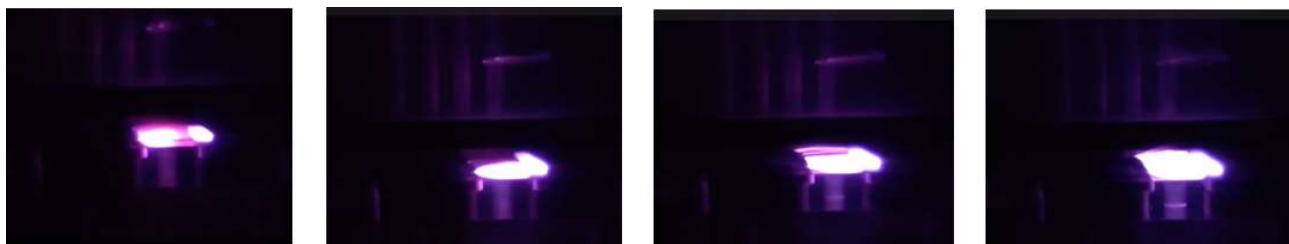


Рис. 7. Разряд при $P_4/P_1 = 150$ отн.ед. Индукция $+\vec{B}$

3.3. Исследование параметров разряда при магнитной индукции $-\vec{B}$

При изменении направления вектора магнитной индукции на противоположное, т.е. $-\vec{B}$, картина изменения величин теплового потока и тока в разрядном промежутке также изменилась. На рис. 8 показаны графики, соответствующие изменению направления вектора магнитной индукции, $-\vec{B}$.

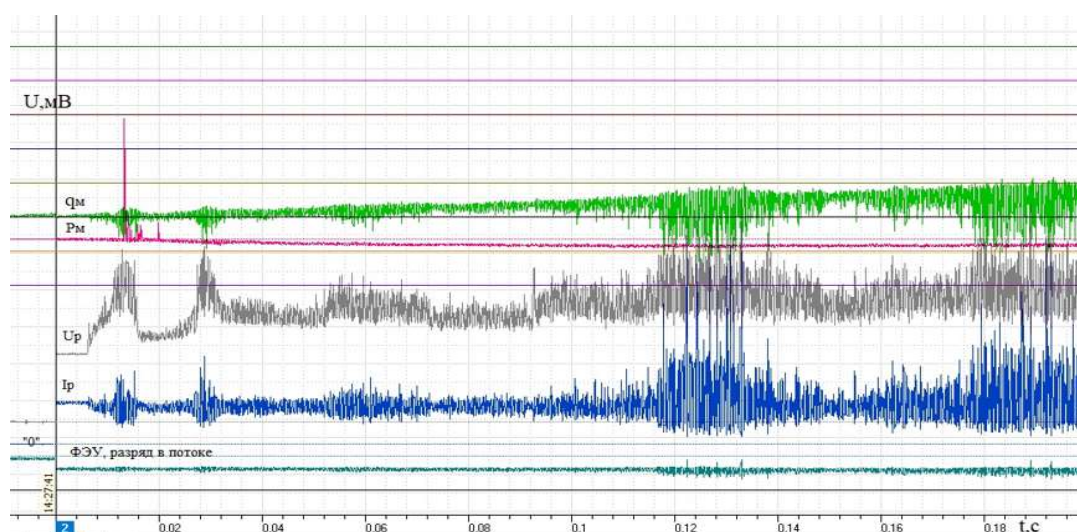


Рис. 8. Разряд при $P_4/P_1 = 150$ отн.ед. Индукция $-\vec{B}$

Сравнение амплитуд на одном временном промежутке после начала истечения потока в одном тестовом режиме, при $P_4/P_1 = 150$ отн.ед., при отсутствии и наличии магнита разной направленности магнитной индукции, показано на рис. 9.

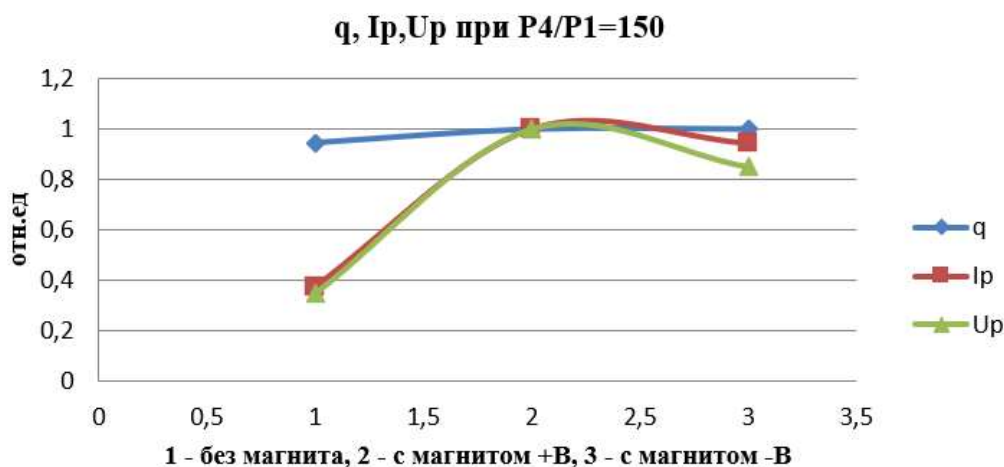


Рис. 9. Влияние наличия магнита на тепловой поток q , ток I_p и напряжение U_p при $P_4/P_1 = 150$ отн.ед.

В одинаковых условиях экспериментов тепловой поток, ток в разрядном промежутке и падение напряжения в нем больше при наличии магнита с индукцией $+\vec{B}$. Тепловой поток меньше зависит от полярности вектора магнитной индукции при идентичных тестовых режимах.

Наиболее интересна плазменная картина при направлении индукции $-\vec{B}$ на разных скоростях потока. Например, на скорости $M = 2.9$ [7], половина катода не охвачена плазмой, как показано на рис. 10.

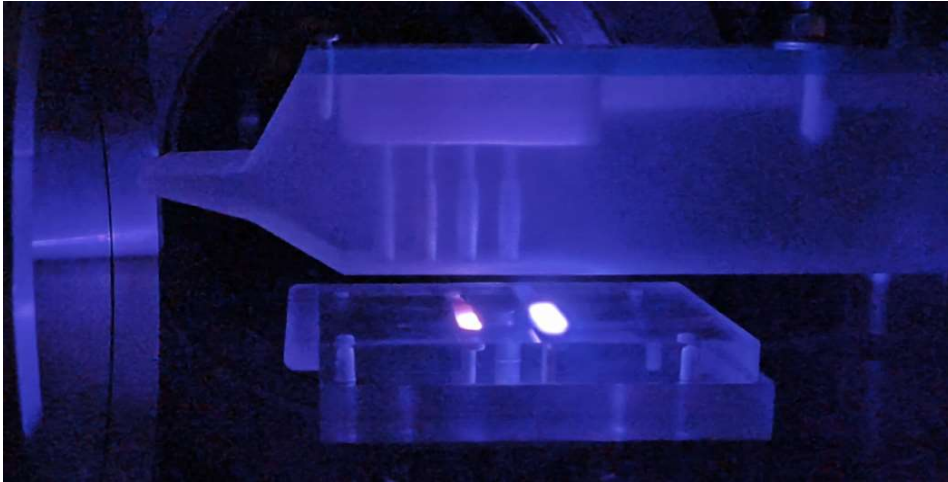


Рис. 10. Свечение разряда с направлением индукции $-\vec{B}$. $M = 2.9$

На более высокой скорости потока в середине катода появилось темное пятно, по размеру магнита, как показано на рис. 11.

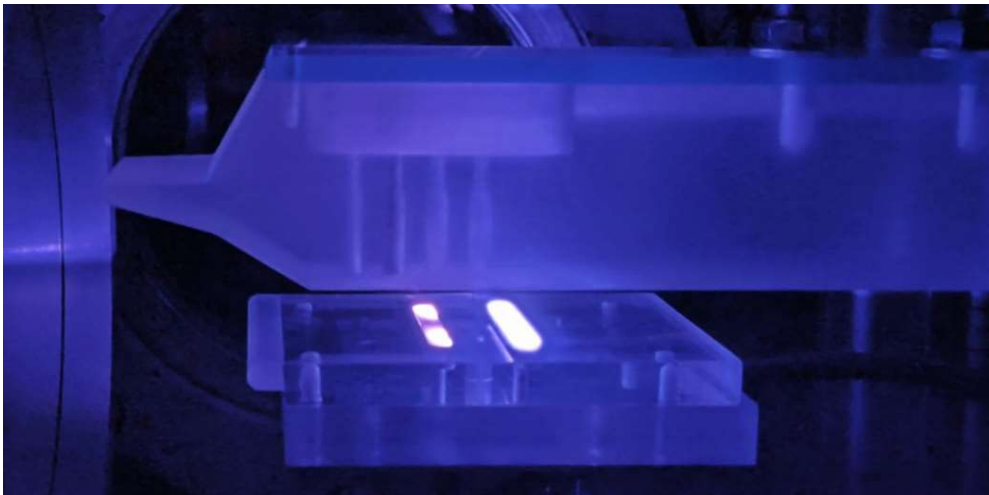


Рис. 11. Свечение разряда при $-\vec{B}$ при возрастании скорости

Развитие свечения происходило более интенсивно, аномальный разряд охватывал всю поверхность электродов (рис. 12).



Рис. 12. Развитие аномального тлеющего разряда при $-\vec{B}$

При задании режимов работы ГУАТ от $P_4/P_1 = 250$ до $P_4/P_1 = 360$ отн.ед. развитие разряда проходило все стадии при запуске сопла: возмущение ($2 \div 4$ мс), нормальный тлеющий разряд (до 20 мс), аномальный тлеющий разряд (до 1.5 с), затем ток и напряжение в разрядном промежутке возрастали до максимума.

Характерное развитие разряда во времени показано на рис. 13.

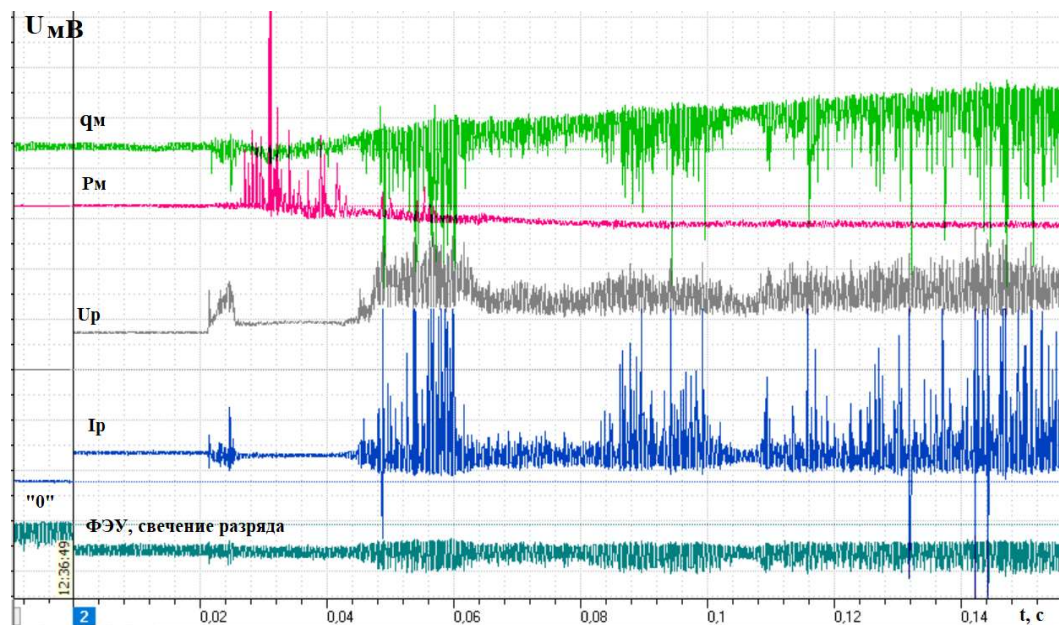


Рис. 13. Разряд при $P_4/P_1 = 360$ отн.ед. Индукция $-\bar{B}$

При тестовом режиме $P_4/P_1 = 360$ [11, 12], на рис. 13 наблюдался длительный (20 мс) нормальный тлеющий разряд.

Рост теплового потока и тока разрядного промежутка с увеличением P_4/P_1 показано на рис. 14.

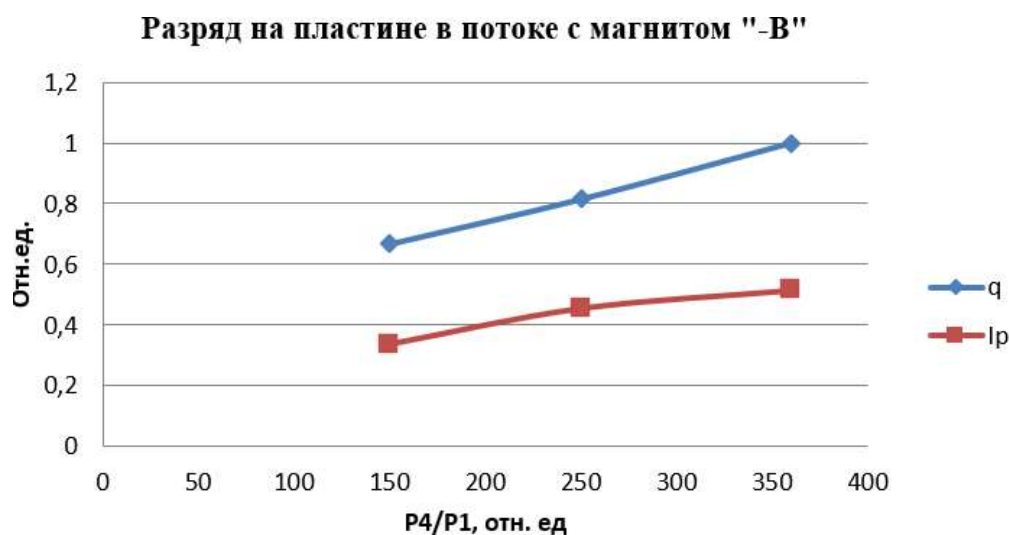


Рис. 14. Тепловой поток q и ток I_p в тестовых режимах на пластине с магнитом $-\bar{B}$

Различие при изменении направления индукции в одном тестовом режиме обнаружено небольшое (см. рис. 9), но нагрев поверхности был больше при магнитной индукции $+\bar{B}$. Возможно из-за малого размера постоянного магнита по сравнению с длиной электродов, магнитно-силовые линии не охватывали электроды целиком и влияли в пределах своего размера. Согласно [8] и мнемоническому «правилу левой руки», положительно направленная

индукция должна инициировать магнитную силу, прижимающую поток частиц к поверхности. Тепловой поток возрос не только из-за нагрева среды разрядом, но и из-за конвективного нагрева поверхности пластины потоком воздуха.

4. Заключение

Экспериментально выявлено, что

- тлеющий разряд на плоской пластине имеет бóльшую продолжительность в потоке по сравнению с разрядом на встречных электродах $1000 \div 1300$ мс против 16 мс. [7] во всех тестовых режимах;
- наличие постоянного магнита увеличивает тепловой поток и ток в разрядном промежутке;
- нагрев поверхности больше при магнитной индукции $+\bar{B}$, чем при $-\bar{B}$;
- из-за малого размера постоянного магнита по сравнению с длиной электродов, магнитно-силовые линии не охватывают электроды целиком и влияют в пределах своего размера, требуется увеличение длины магнита, не менее, чем длина электродов;
- тлеющий разряд имеет области как аномального, так и нормального существования;
- маломощность разряда, его длительная продолжительность и влияние его на газовый поток позволяют предположить его практическое применение и дальнейшее изучение.

Литература

1. Shang J. S., Surzhikov S. T., Kimmel R., Gaitonde D., Menart J., Hayes J. Mechanisms of plasma actuators for hypersonic flow control // Progress in Aerospace Sciences. 2005. Vol. 41. Pp. 642–668.
2. Суржиков С. Т. Гиперзвуковое обтекание острой пластины и двойного клина с электромагнитным актюатором // МЖГ. 2020. Т. 6. С. 106–120.
3. Surzhikov S. T. Surface electromagnetic actuator in rarefied hypersonic flow // IOP Conf. Ser.: J. Physics: Conf. Series 815. 2017. 012005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/815/1/012005>
4. Surzhikov S.T. Theoretical and Computational Physics of Gas Discharge Phenomena. Walter de Gruyter GmbH, 2020. 549 p.
5. Стариковский А. Ю., Александров Н. Л. Управление газодинамическими потоками с помощью сверхбыстрого локального нагрева в сильнонеравновесной импульсной плазме // Физика Плазмы. Т. 47. № 2. С. 126–192. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2006/2006.11681.pdf>
6. Знаменская И. А. и др. Взаимодействие ударной волны с пристеночным слоем остывающей плазмы импульсного поверхностного разряда // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2012. Т.13, вып. 3. <http://chemphys.edu.ru/issues/2012-13-3/articles/359/>
7. Солодовников С. И., Рулева Л. Б. Экспериментальные исследования газоразрядной плазмы в потоке // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2023. Т. 24, вып. 6. <http://chemphys.edu.ru/issues/2023-24-6/articles/1079/>
8. Суржиков С. Т. Расчетное исследование параметров аномального тлеющего разряда на поверхности обтекаемой газом пластины // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2022. Т. 23, вып. 3. <http://chemphys.edu.ru/issues/2022-23-3/articles/1006/>
9. Menart J., Shang J.S., Kimmel R., Hayes J. Effect of Magnetic Fields on Plasma Generated in a Mach 5 Wind Tunnel // AIAA Paper 2003-4165, June 2003.
10. Панасенко А. В., Рулева Л. Б. О нестационарном течении в сопло // Сборник материалов 15-й международной конференции 19–22 ноября 2024 г. «Волны и вихри в сложных средах». Москва. М.: ООО «ИСПО-принт», 2024. С. 171–174.
11. Суржиков С. Т. Расчетные исходные данные для решения тестовых задач в рабочей зоне гиперзвуковой ударной аэродинамической трубы ГУАТ лаборатории РадГД ИПМех РАН // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2021. Т. 22, вып. 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2021-22-1/articles/930/>

12. Суржиков С. Т. Расчетные исходные данные для решения тестовых задач в измерительной секции гиперзвуковой ударной аэродинамической трубы ГУАТ лаборатории РадГД ИПМех РАН // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2021. Т. 22, вып. 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2021-22-1/articles/931>

Reference

1. Shang J. S., Surzhikov S. T., Kimmel R., Gaitonde D., Menart J., Hayes J., Mechanisms of plasma actuators for hypersonic flow control, *Progress in Aerospace Sciences*, 2005, vol. 41, pp. 642–668. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2005.11.001>
2. Surzhikov S. T., Hypersonic flow past a sharp plate and a double wedge with an electromagnetic actuator, *Fluid Dynamics*, 2020, vol. 55, no. 6, pp. 825–839. DOI: 10.1134/s0015462820060117
3. Surzhikov S. T., Surface electromagnetic actuator in rarefied hypersonic flow, *IOP Conf. Ser.: J. Physics: Conf. Series*, 2017, vol. 815, p. 012005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/815/1/012005>
4. Surzhikov S. T., *Theoretical and Computational Physics of Gas Discharge Phenomena*, Walter de Gruyter GmbH, 2020. 549 p.
5. Starikovskiy A. Yu., Alexandrov N. L., Control of gas dynamic flows using ultrafast local heating in a highly nonequilibrium pulsed plasma, *Fizika Plazmy*, 2021, vol. 47, no. 2, pp. 126–192. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2006/2006.11681.pdf>. DOI: 10.31857/S0367292121020062
6. Znamenskaya I. A., Ivanov I. E., Koroteeva E. Yu., Orlov D. M., Kryukov I. A., Shock wave interaction with a near-wall layer of cooling plasma from a pulsed surface discharge, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2012, vol. 13, issue 3. <http://chemphys.edu.ru/issues/2012-13-3/articles/359/>
7. Solodovnikov S. I., Ruleva L. B., Experimental studies of gas-discharge plasma in a stream, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2023, vol. 24, iss. 6. <http://chemphys.edu.ru/issues/2023-24-6/articles/1079/>
8. Surzhikov S. T., Computational Study of the Parameters of an Anomalous Glow Discharge on the Surface of a Gas-Flowed Plate, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2022, vol. 23, iss. 3. <http://chemphys.edu.ru/issues/2022-23-3/articles/1006/>
9. Menart J., Shang J. S., Kimmel R., Hayes J., Effect of Magnetic Fields on Plasma Generated in a Mach 5 Wind Tunnel, AIAA Paper 2003-4165. <https://doi.org/10.2514/6.2003-4165>
10. Panasenko A. V., Ruleva L. B., On unsteady flow into the nozzle, *Proceedings of the 15th International Conference "Waves and vortices in complex media"*, Moscow, 2024, pp. 171–174.
11. Surzhikov S. T., Calculated initial data for solving test problems in the working area of the hypersonic shock wind tunnel HAST of the RadGD Laboratory of the IPMech RAS, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2021, vol. 22, iss. 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2021-22-1/articles/930/>
12. Surzhikov S. T., Calculated initial data for solving test problems in the measuring section of the hypersonic shock wind tunnel (HSWT) of the RadGD Laboratory of IPMech RAS, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2021, vol. 22, iss. 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2021-22-1/articles/931/>

Статья поступила в редакцию 15 декабря 2024 г.