

Experimental Studies of Gas-Discharge Plasma in Air Flow

S. I. Solodovnikov, L. B. Ruleva

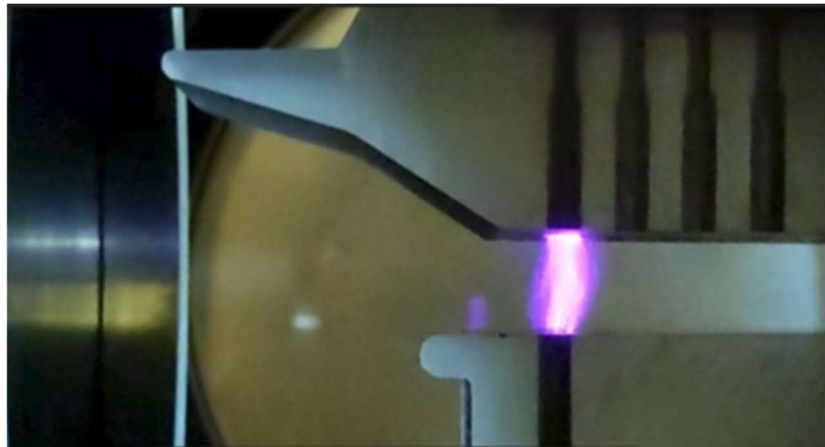
*Ishlinskyi Institute for Problems in Mechanics Russian Academy of Sciences (IPMech RAS),
Moscow, 119526, Russia*

ruleva@ipmnet.ru

Abstract

Gas-discharge plasma combustion and its quasi-stationary state in the aerodynamic block of a laboratory installation were obtained. The research model in the form of a flat channel with electrodes, pressure and heat flow sensors were shown. The mutual influence of a gas-discharge plasma and an air flow at velocity of $M=2.9$ was investigated. Video-frames the transformation of the gas-discharge column glow in the flow and shadow patterns of shock wave structures was obtained. Discharge energy supply effects on the glow state of the discharge column and on the flow were shown. The existence of a normal glow discharge in the flow, an increase in heating and a decrease in pressure on the surface of the model was established.

Keywords: gas- discharge plasma, air flow, experiment.



Discharge in supersonic air flow

УДК 537.525

Экспериментальные исследования газоразрядной плазмы в потоке воздуха

С. И. Солодовников, Л. Б. Рулева

*Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук
Россия, Москва, 119526, проспект Вернадского, д. 101-1*

ruleva@ipmnet.ru

Аннотация

Приведены режимы горения газоразрядной плазмы и ее квазистационарного состояния в аэродинамическом блоке лабораторной установки. Показана модель исследования в виде плоского канала с электродами, датчиками давления и теплового потока. Исследовано взаимное влияние газоразрядной плазмы и воздушного потока на скорости Маха $M=2,9$. Получены видеокadres трансформации свечения газоразрядного столба в потоке и теневые картины ударно-волновых структур. Показаны влияния энерговклада разряда на состояние свечения столба разряда и на течение потока. Установлено существование нормального тлеющего разряда в потоке, повышение нагрева и снижение давления на поверхности модели.

Ключевые слова: газоразрядная плазма, воздушный поток, эксперимент

1. Введение

Теоретические и практические исследования газоразрядной плазмы как самостоятельного явления [1–4], так с целью управления скоростными потоками [5–6] востребованы в настоящее время. Наиболее известны исследования, подтвержденные экспериментально, в работах по наносекундным импульсным нагревам газа при высоких импульсных полях. В результате нагрева возможно управление конфигурацией ударных волн, отрывными течениями, ламинарно-турбулентным переходом, пограничными слоями. Исследования [7–9] посвящены динамике свечения плазмы импульсного поверхностного, объемного разряда наносекундной длительности в покоящемся воздухе и в высокоскоростных потоках. Экспериментальная установка [7] содержала канал с плазменными листами, а высоковольтное питание находилось в пределах $25 \div 30$ кВ при токе 50 А. Замечено, что свечение релаксирующей плазмы в течение нескольких микросекунд после окончания тока разряда связано с режимами течения. Показана возможность управления конфигурацией ударных волн и то, что метод эффективен также на малых дозвуковых скоростях [8].

Преимущества импульсных наносекундных оптических разрядов в бесконтактном введении энергии с фокусировкой в нужном месте с образованием искры и ионизации газа. При этом диапазон длины волны различный у разновидностей лазеров, таких как газовых, твердотельных фемтосекундных [10, 11].

Работа [12] посвящена теоретическому исследованию нормального тлеющего разряда. Результаты физического и математического моделирования нормального тлеющего разряда (НТР) газоразрядной плазмы постоянного тока представлены в [13]. Показаны условия ее квазистационарности при энерговкладе на порядок меньше, чем для импульсных разрядов. В отличие от аномального разряда постоянного тока НТР характеризуется наименьшей постоянной плотностью тока. При уменьшении электрического тока, протекающего через разряд, «напряжение на катодном слое, с некоторого момента сохраняет свое минимально возможное значение, разряд стягивается, и занимает лишь часть поверхности катода» [13]. Таким

образом, образуется квазистационарная саморегулируемая плазма. Применение такого типа разряда для управления воздушным потоком явилось целью настоящего исследования.

2. Предварительные эксперименты и методика исследования

При инициации квазистационарной плазмы в аэродинамическом блоке установки (ГУАТ) использовались режимы, способствующие ее существованию, исследованиями НТР в работе [13], с вертикальными электродами. Фото, схема установки НТР и вольт–амперные характеристики (ВАХ) из работы [13] показаны на рисунках 1 и 2.

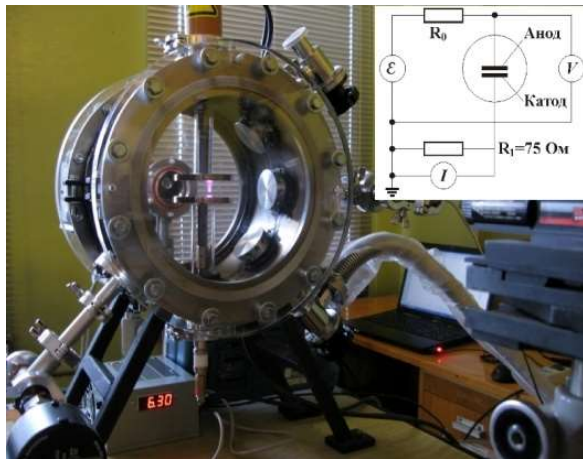


Рис. 1. Установка НТР

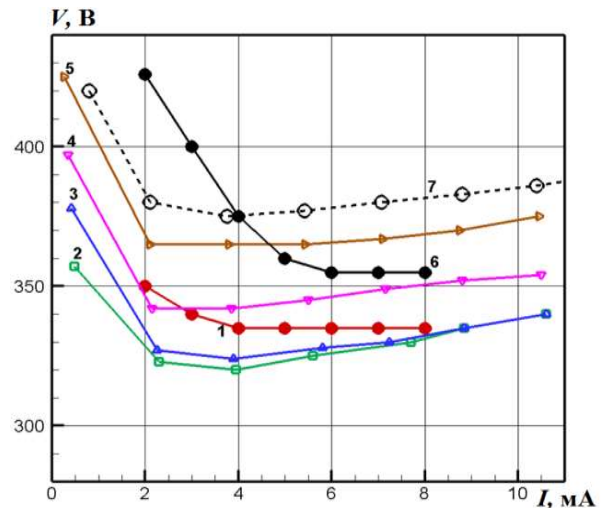


Рис. 2. ВАХ в $N_2:1$, 6 – эксперимент ($p=3$ и 5 Torr); 2 – 5 ($p=3$ Torr), 7 (5 Torr) – расчет

На установке НТР применялся источник питания Spellman SA4, который подавал на электроды максимальное напряжение 400 В и регулируемый ток в пределах до 10 мА. Напряжение на газоразрядном промежутке и ток в нем измерялись с использованием аналого-цифрового преобразователя АЦП (10 МГц), подключенного к компьютеру посредством делителей: балластного сопротивления ($R_0 = 300$ кОм) и шунта ($R = 75$ Ом), соответственно.

В неподвижной среде сопряженное численное и физическое моделирование НТР в молекулярном азоте при давлении $p = 3$ Торр и $p = 5$ Торр показало удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных данных. Плотность электронов в плазме тлеющего разряда была на уровне 10^9 см⁻³. Области существования квазистационарной плазмы, судя по ВАХ рис. 2, в экспериментах, находились на уровне 4 ÷ 8 мА при $p = 3$ Торр и 6 ÷ 8 мА при $p = 5$ Торр. Электрическая схема НТР, источник питания и исследованный диапазон параметров были адаптированы для экспериментов с НТР в потоке на лабораторной установке ГУАТ.

Ионизационные процессы наблюдались в ударной трубе ГУАТ [14]. Свечение может быть обусловлено ионизацией переднего фронта ударной при высоких скоростях потока. Ионизацию переднего фронта иногда регистрируют при добавлении в поток тяжелого газа [15], однако способ определения локализации ионизации более прост в [14].

В ударной трубе установки ГУАТ при торможении ударной волны у входа в сопло газ ионизируется, как показано на рис. 3 при резком возрастании давления и температуры (рис. 4).

Изображенное на рис. 3 свечение и график рис. 4 его регистрации фотоэлектронным умножителем (ФЭУ), также способствовали пониманию трансформации НТР в потоке, и ионизации газа при торможении скачков уплотнения о поверхности модели.



Рис. 3. Свечение УВ в УТ

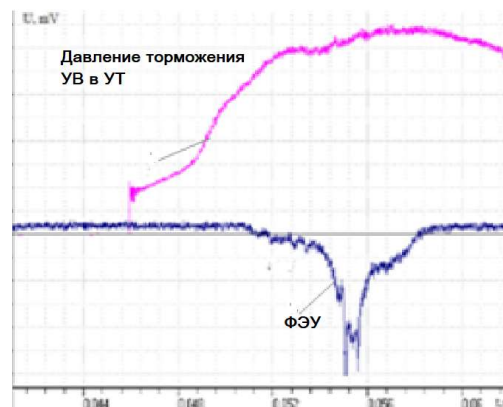


Рис. 4. Регистрация ФЭУ ионизации в УТ

3. Лабораторная установка

В аэродинамическом блоке ГУАТ рис. 5, объемом 800 л, что более чем в 100 раз больше, чем установки НТР [13], была закреплена за соплом акриловая модель плоского канала, образованного двойным полуклином и затупленной кромкой на расстоянии 10 мм друг от друга. В модель были внедрены электроды, а на нижней пластине – датчики давления и теплового потока на расстоянии 100 мм от катода (рис. 6).



Рис. 5. ГУАТ

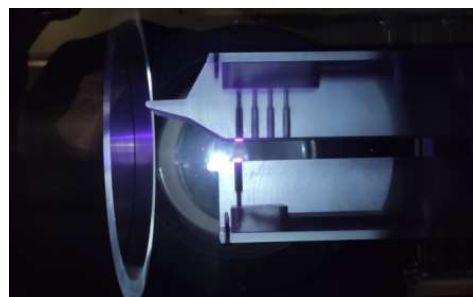


Рис. 6. Модель плоского канала

Разряд светился при напряжении на электродах от высоковольтного источника питания Spellman SA4 больше, чем в установке НТР, а именно, $2 \div 2.5$ кВ. При этом максимальный ток был не более 6 мА. Процесс горение плазмы регистрировался видеокамерой со скоростью 120 кадр/с, а теневые картины ударно-волновых взаимодействий плазмы с потоком – высо-

коскоростной камерой 3000 кадр/с. Свечение разряда регистрировалось ФЭУ. Ток и напряжение разрядного промежутка, в соответствии со схемой рис. 1 регистрировались через средство шунта (75 Ом) и балластного сопротивления (300 кОм). Сертифицированные не малоинерционные датчик давления РСВ106В50 и датчик теплового потока ДТП094 установлены на затупленной кромке за 100 мм от катода.

Сигналы датчиков оцифровывались аналого–цифровыми преобразователями с частотой 10 МГц и отображались программой Powergraph в компьютере с шагом 0.4 мкс.

4. Результаты экспериментов

Разряд зажигался не в азоте как [13], но и в воздухе при давлениях $3 \div 5$ Торр, при напряжении на электродах $2 \div 2.5$ кВ и токах $3 \div 6$ мА. В неподвижном воздухе разряд стабильно горел до момента снижения давления менее 3 Торр. Физические картины экспериментов в ГУАТ и на установке НТР соответствовали друг другу. При этом разрядный столб в ГУАТ не совершал движения, и его поперечное сечение не меняло своего минимального значения. Можно отметить длительный диапазон квазистационарного состояния плазмы в широких пределах изменения питающего напряжения. Измеренные ВАХ питания на электродах и ВАХ в разрядном промежутке представлены на графиках рис. 7.

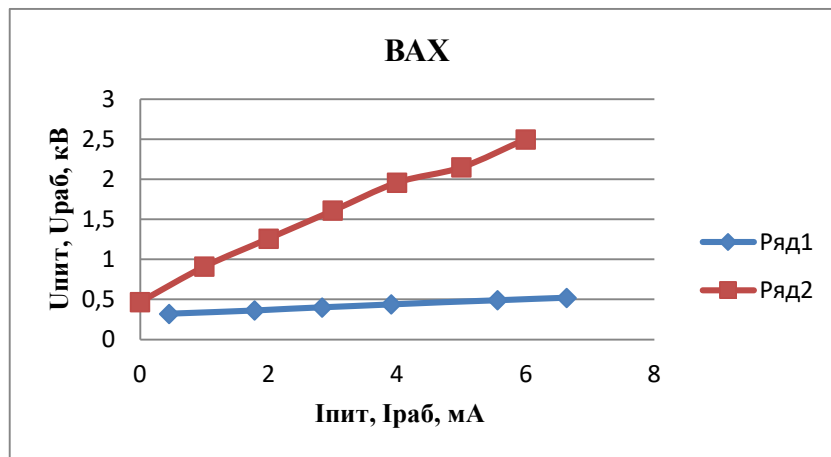


Рис. 7. ВАХ питания (ряд 2) и ВАХ разрядного промежутка (ряд 1)

При изменении тока в разрядном промежутке $I_{раб}$ от 7 мА до 3 мА напряжение в разрядном промежутке $U_{раб}$ квазистационарно, что соответствует определению нормального тлеющего разряда и дает возможность зафиксировать этот факт в дальнейшем при взаимодействии разряда с потоком.

При взаимодействии газоразрядной плазмы с воздушным потоком на числах Маха $M = 2.94$ разрядный столб сначала вытягивал по потоку, затем истончался и разрывался

На рис. 8 приведены последовательные кадры видеосъемки: а) плазма и поток отсутствуют; б) разряд зажжен, поток отсутствует; в) газоразрядная плазма есть, поток отсутствует; г) изгиб газоразрядного столба в потоке; д) истончение газоразрядного столба в потоке, что похоже на поднормальный режим горения; е) угасание газоразрядного столба в потоке.

Данные заданных параметров в [13] по давлению среды и току разрядного столба способствовали сразу, без поисков, получить нормальный тлеющий разряд. Различие в том, что вместо напряжения питания 400 В, напряжение 2 кВ обеспечивало ток питания 5 мА.

Пример теневого ударно–волновых конфигураций, при обтекании моделей потоком $M = 2.9$, в присутствии горения газоразрядной плазмы, хотя самого горения в теновом режиме не видно, показаны на рис. 9 в развитии.

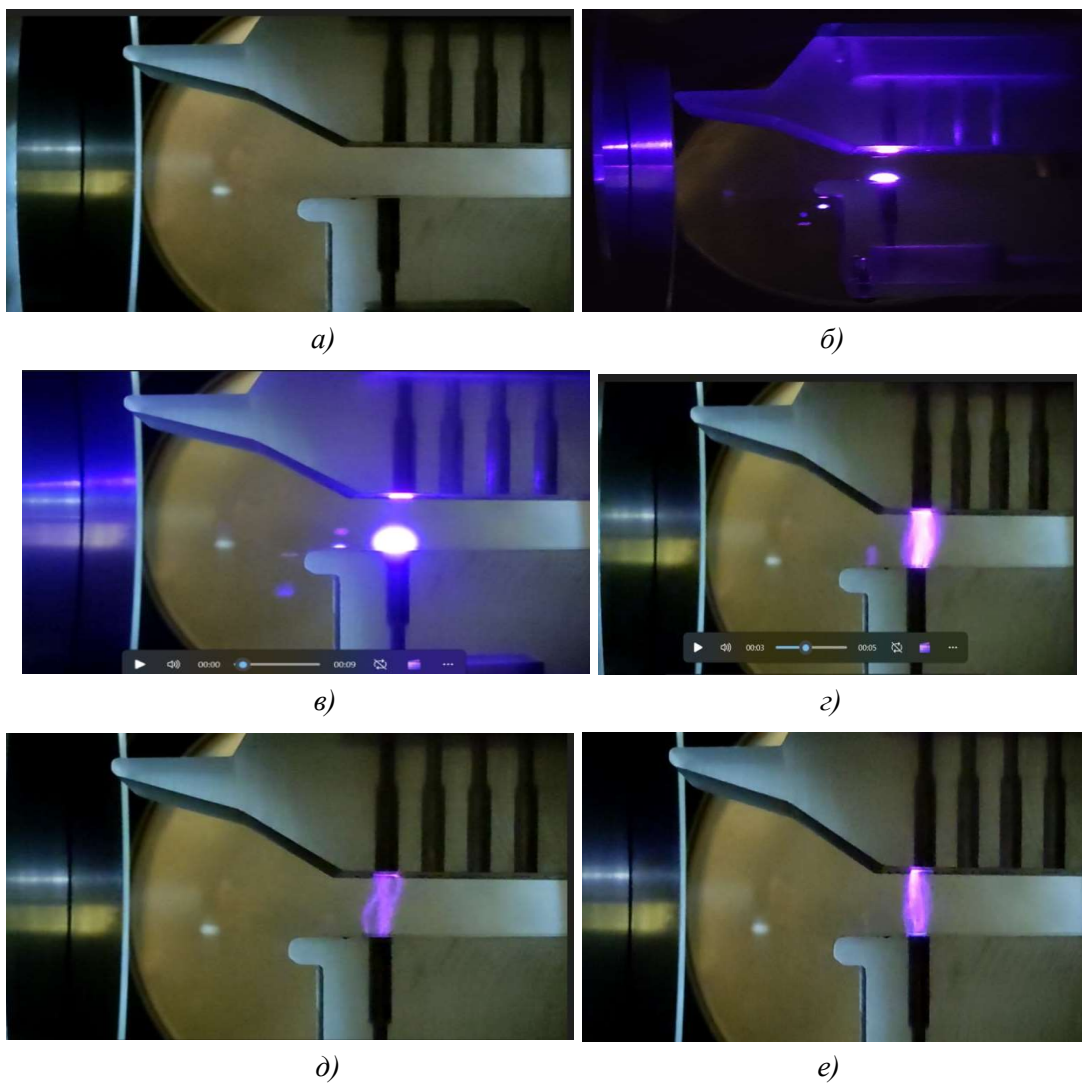


Рис. 8. Разряд в потоке ГУАТ

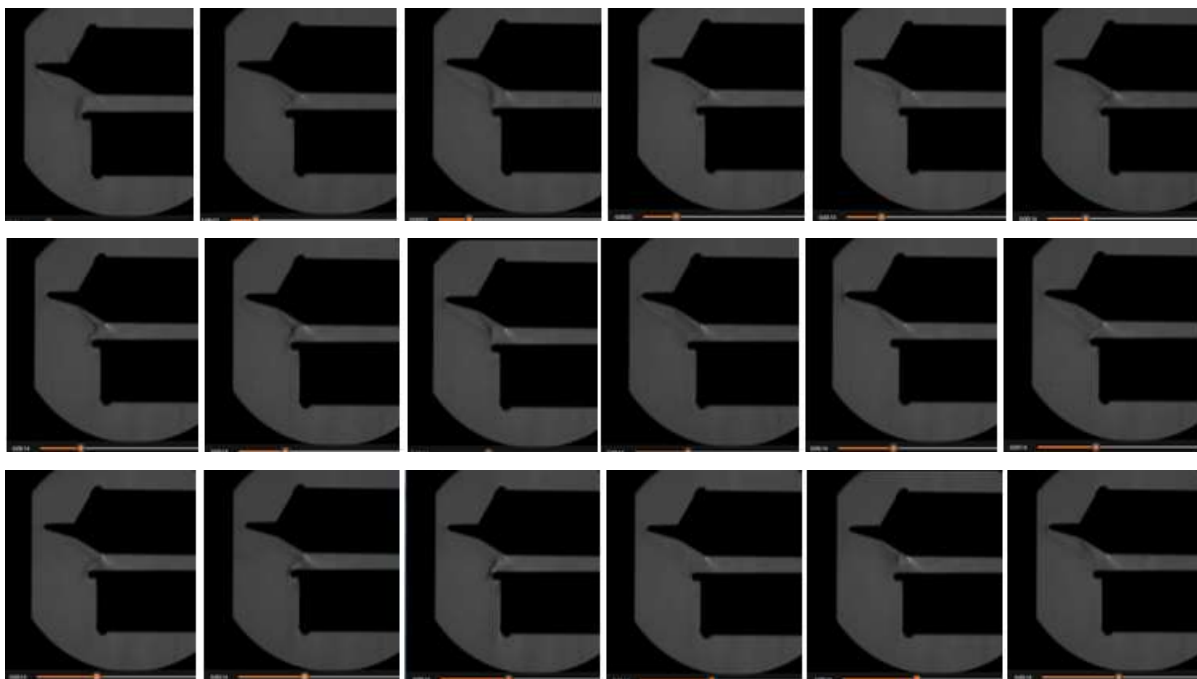


Рис. 9. Теневая картина в развитии (слева направо сверху вниз)

Теневая картина показывает, как меняется толщина энтропийного слоя, минимизация которого свидетельствует о снижении потребления энергии. Затем поток усиливается, и освещенные фрагменты показывают, что плотности потока увеличивается при столкновении скачков уплотнения, отраженных от краев верхней и нижней модели. Затем следует длительное снижение плотности среды в потоке. Вероятно, этот факт свидетельствует об увеличении скорости потока и затухании ударных отраженных волн.

Наиболее информативным свидетельством взаимодействия разряда с потоком служат показания датчиков, представленных на рис. 10.

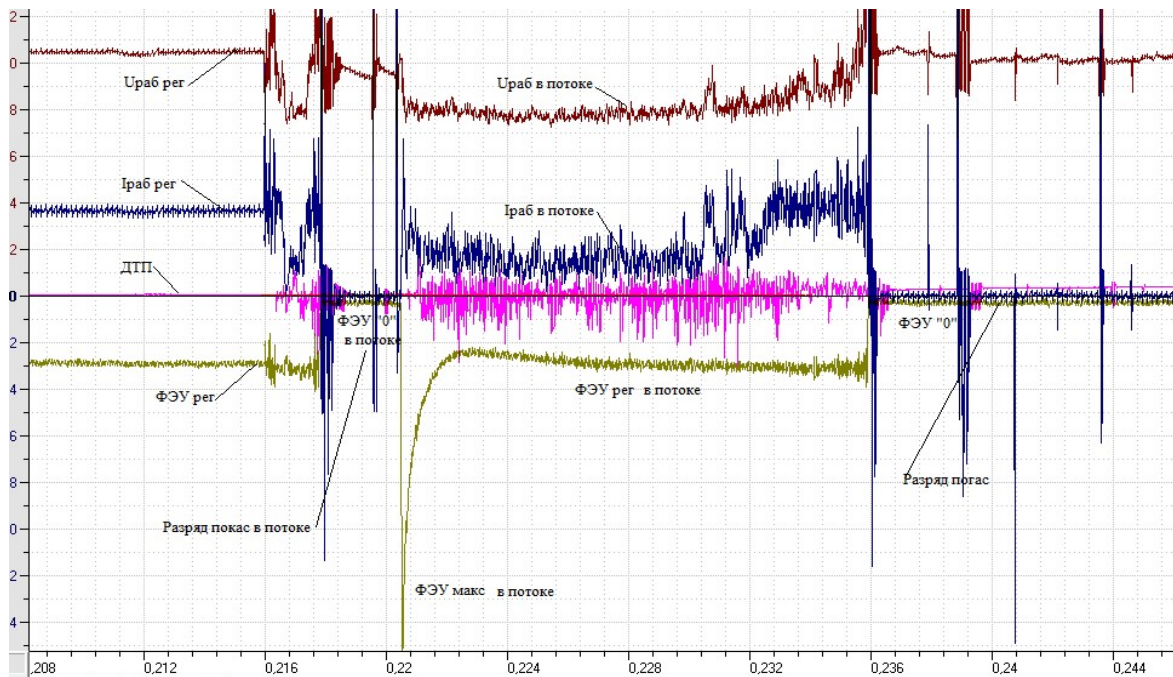


Рис. 10. Показания датчиков в потоке $M=2.9$ с разрядом. $U_{пит} = 2.0$ кВ, $I_{пит} = 5$ мА

Начало графиков соответствует зажженному разряду в отсутствии потока при высоковольтном питании 2 кВ и токе 5 мА. Свечение регистрирует ФЭУ. Ток $I_{раб}$ и напряжение $U_{раб}$ в разрядном промежутке установились в положении нормального тлеющего разряда. При встрече с потоком разряд погас (его сдувает поток) на 2 мс. Затем разряд резко вспыхивал, а далее ФЭУ показывал стабильное свечение. Вспышка ФЭУ может объясняться появлением затравочных электронов, ионизацией среды, и приповерхностных структур моделей вследствие ударов о них отраженных скачков уплотнения, как это было замечено в ударной трубе ГУАТ [14, 15].

Равномерное свечение ФЭУ, а также квазистационарное состояние напряжения $U_{раб}$ в разрядном промежутке, может свидетельствовать о нормальности тлеющего разряда, которое наблюдалось в течение 16 мс. Сигнал датчика теплового потока (ДТП) в потоке активизировался. Затем, когда разряд погас, на ФЭУ и $I_{раб}$ наблюдался нулевой сигнал, а тепловой поток при этом монотонно возрастал. Считается, что увеличение температуры газа в результате энерговыделения в разряде усиливает отрыв пограничного слоя и ведет к перераспределению давления вдоль поверхности объекта [9].

При более высоких заданных напряжениях питания на электродах характер взаимодействия газоразрядной плазмы с потоком менялся, как показано на рис. 11.

Разряд не сносится потоком, и сигнал ФЭУ плавно переходил к регистрации более яркого свечения. Минимальные квазипостоянные значения показывали напряжение $U_{раб}$ и ток $I_{раб}$ в разрядном промежутке. Возмущенное состояние датчика теплового потока ДТП в разряде, сменялось его монотонным ростом после того, как разряд погас. Сигнал датчик давления снижался с начала течения и продолжался после свечения разряда.

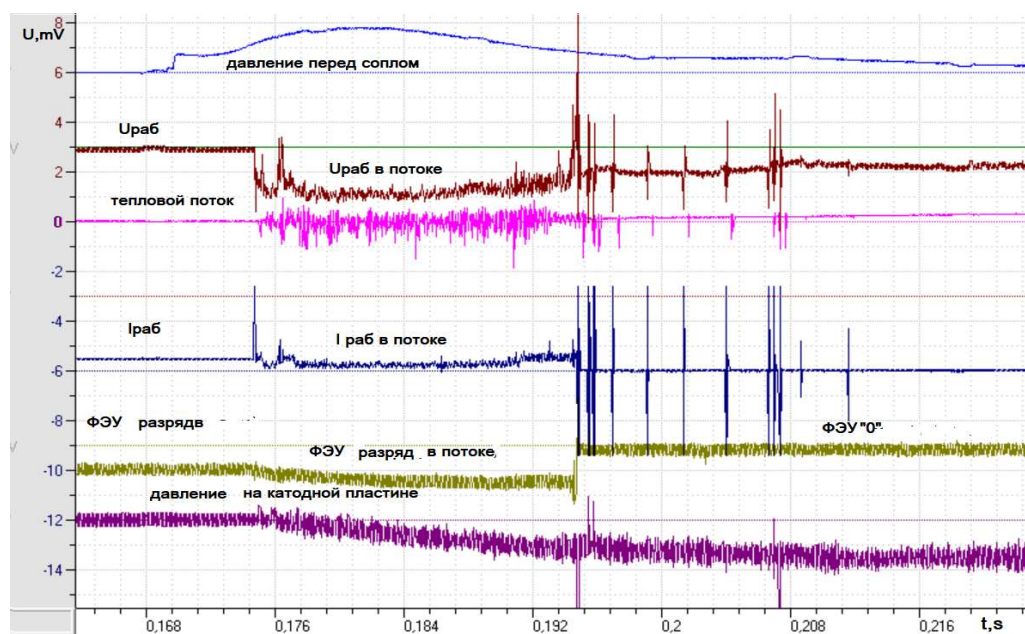


Рис. 11. Показания датчиков в потоке $M=2.9$ с разрядом. $U_{пит} = 2.5$ кВ, $I_{пит} = 6$ мА

Снижение давления в потоке приводит к уменьшению плотности среды и, значит, к увеличению скорости потока. Этот вывод подкрепляют кадры теневой видеосъемки рис. 9.

5. Заключение

Эксперименты с газоразрядной плазмой в неподвижной среде и в скоростном потоке показали согласие по формированию параметров нормального тлеющего разряда. Отмечено устойчивое горение при давлениях $3 \div 8$ Торр, напряжении питания $2 \div 2.5$ кВ и токе $3 \div 6$ мА.

Анализ опытных и расчетных данных позволил идентифицировать НТР и быстро находить области существования квазистационарной газоразрядной плазмы в экспериментах. Эксперименты с газоразрядной плазмой в области расположения моделей перед гиперзвуковым соплом показали трансформацию разряда при квазистационарном и нестационарном обтекании моделей воздушным потоком.

Выявлено повышение нагрева газа после распада плазмы, а также снижение давления, которые ведут к снижению плотности потока, что, в свою очередь, должно привести к увеличению скорости потока.

Благодарности и ссылка на гранты

Работа поддержана грантом РФФ № 22-11-00062.

Литература

1. Surzhikov S. T. Theoretical and Computational Physics of Gas Discharge Phenomena. –2020.– De Gruyter. Berlin, New York.– 537 с. doi: 10.1515/9783110648836
2. Surzhikov S. T. Comparative Analysis of the Parameters of the Normal and Abnormal DC Glow Discharges//Plasma Physics Reports.– 2022.– Pp. 1261–1272. doi: 10.1134/s1063780x22700337
3. Суржиков С. Т. Физическая механика газовых разрядов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, Серия «Компьютерные модели физической механики». 2006. 640 с. ISBN 5-7038-2741-8.
4. Суржиков С. Т. Тепловое излучение газов и плазмы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, Серия «Компьютерные модели физической механики». 2004. 544 с. ISBN 5-7038-2604-7.
5. Shang J. S, Surzhikov S. T. Plasma Dynamics for Aerospace Engineering. –2018. – Cambridge University Press – 388 p. doi: 10.1017/9781108292566

6. Суржиков С. Т. Сравнительный анализ параметров нормального и аномального тлеющих разрядов постоянного тока // Физика плазмы. 2022. Т. 48. Вып. 11. С. 1102–1114. DOI: 10.31857/S0367292122601072
7. 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/>
8. Дорощенко И. А. и др. Исследование плазмодинамических процессов наносекундного диапазона при формировании ударных волн от импульсных разрядов // ЖТФ. 2018. Т. 88, вып. 5. С. 684–691. DOI: 10.21883/JTF.2018.05.45895.2435
9. Стариковский А.Ю., Александров Н.Л. Управление газодинамическими потоками с помощью сверхбыстрого локального нагрева в сильнонеравновесной импульсной плазме // Физика плазмы. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2006/2006.11681.pdf>
10. Райзер Ю. П. Лазерная искра и распространение разрядов. М.: Наука, 1974.
11. Aleksandrov N. L., et al. // Phys. Rev. E. 2016. Vol. 94. P. 013204 .
12. Суржиков С. Т., Райзер Ю. П. Еще раз о природе эффекта нормальной плотности тока на катоде тлеющего разряда // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. № 8. С. 452–456.
13. Surzhikov S. T., et al. Normal Glow Discharge: Comparison of Calculated and Experimental Data // Interperiodica Publishing. – 2019. – С. 154–158. doi: 10.1134/s1028335819040049
14. Рулева Л. Б., Солодовников С. И. Патент РФ № 2799656 от 10.07.2023. Способ определения локализации ионизации газа.
15. Зиборов В. С. и др. Эффект ионизации во фронте слабой ударной волны, распространяющейся в инертном газе, разбавленном малой концентрацией $\text{Mo}(\text{CO})_6$ // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 86. № 3. С. 211–215. <https://www.mathnet.ru/links/1911ea555a4c20adf63cbf7bd96abe5/jetpl817.pdf>

References

1. Surzhikov S. T., *Theoretical and Computational Physics of Gas Discharge Phenomena*, De Gruyter. Berlin, New York, 2020, 537 p. DOI: 10.1515/9783110648836
2. Surzhikov S. T., Comparative Analysis of the Parameters of the Normal and Abnormal DC Glow Discharges, *Plasma Physics Reports*, 2022, pp. 1261–1272 [in Russian]. DOI: 10.1134/s1063780x22700337
3. Surzhikov S. T., *Physical mechanics of gas discharges*, M.: Publishing house of Bauman MSTU, Series “Computer Models of Physical Mechanics”, 2006, 640 p. ISBN 5-7038-2741-8. [in Russian].
4. Surzhikov S. T., *Thermal radiation of gases and plasma*, M.: Publishing house of Bauman MSTU, Series “Computer Models of Physical Mechanics”, 2004, 544 p. ISBN 5-7038-2604-7. [in Russian].
5. Shang J. S., Surzhikov S. T., *Plasma Dynamics for Aerospace Engineering*, Cambridge University Press, 2018, 388 p. DOI: 10.1017/9781108292566
6. Surzhikov S. T., Comparative Analysis of the Parameters of the Normal and Abnormal DC Glow Discharges, *Plasma Physics Reports*, 2022, vol. 48, no. 11, pp. 1102–1114 [in Russian]. DOI: 10.31857/S0367292122601072
7. Znamenskaya I. A., et al., 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, no. 3 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2012-13-3/articles/359/>
8. Doroschenko I. A., et al., Analysis of Plasmadynamic Nanosecond-Range Processes in the Formation of Shock Waves from Pulsed Discharges, *Technical Physics*, 2018, vol. 88, no. 5, pp. 684–691 [in Russian]. DOI: 10.21883/JTF.2018.05.45895.2435
9. Starikovskiy A. Yu., Alexandrov N. L., Gasdynamic Flow Control by Superfast Local Heating in a Strongly Nonequilibrium Pulse Plasma, *Fizika Plasmy*, vol. 47, no. 2 [in Russian]. DOI: 10.31857/S0367292121020062

10. Raizer Yu. P., *Laser spark and discharge propagation*, M.: Nauka, 1974. [in Russian].
11. Aleksandrov N. L., et al., *Phys. Rev. E*, 2016, vol. 94, p. 013204
12. Raizer Yu. P., Surzhikov S. T., Nature of the effect of normal current-density on a glow-discharge cathode, *Pisma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*, 1987, vol. 13, no. 8, pp. 452–456 [in Russian].
13. Surzhikov S. T., et al., Normal Glow Discharge: Comparison of Calculated and Experimental Data, *Interperiodica Publishing*, 2019, pp. 154–158. DOI: 10.1134/s1028335819040049
14. Ruleva L. B., Solodovnikov S. I., *Method for determining the localization of gas ionization*, RF Patent No. 2799656 dated July 10, 2023. [in Russian].
15. Ziborov V. S., et al., Ionization effect in the front of a weak shock wave propagating in an inert gas diluted by a small amount of Mo(CO)₆, *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 2007, vol. 86, no. 3, pp. 184–188. <https://doi.org/10.1134/S0021364007150076>

Статья поступила в редакцию 5 декабря 2023 г.