



Экспериментальные исследования газоразрядной плазмы в стационарных и динамических средах¹

Солодовников С.И., Рулева Л.Б.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

Введение

Многолетние исследования квазистационарной газоразрядной плазмы востребованы по сей день [1, 2]. Нормальный тлеющий разряд (НТР) характеризуется наименьшей постоянной плотностью тока. В паре катод-анод 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 [3].

Известны исследования [4] динамики свечения плазмы импульсного поверхностного, объемного разряда в покоящемся воздухе и в скоростных потоках при инициировании разряда в наносекундной длительности. Показано, что релаксирующая плазма имеет свечение в течение нескольких микросекунд после окончания тока разряда, которое связано с режимами течения. Вопросы управления конфигурацией ударных волн при обтекании с помощью сверхбыстрого локального нагрева среды при создании и распаде сильнонеравновесной импульсной плазмы показали, что метод эффективен

и на малых дозвуковых скоростях [5].

Эксперименты с газоразрядной плазмой проведены на специально созданной установке [4] для исследования «Нормального тлеющего разряда» (НТР), а затем были адаптированы к установке (ГУ-АТ).

Лабораторная установка НТР

Схема лабораторной установки НТР показана на Рис. 1, на Рис. 2 приведены вольт-амперные характеристики (ВАХ) в азоте.

В экспериментах использовался источник питания Spellman SA4. 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. Проводилось фотографирование разряда при разных значениях ЭДС (ϵ) источника питания, что позволило получать оценочные значения диаметра токового столба в области положительного столба, катодного и анодного пятен. В неподвижной среде сопряженное численное и физическое моделирование нормального тлеющего разряда (НТР) в молекулярном азоте при давлении 3 и 5 Торр показало удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных данных. Анализ опытных и расчетных

¹Работа поддержана грантом РФФ № 22-11-00062

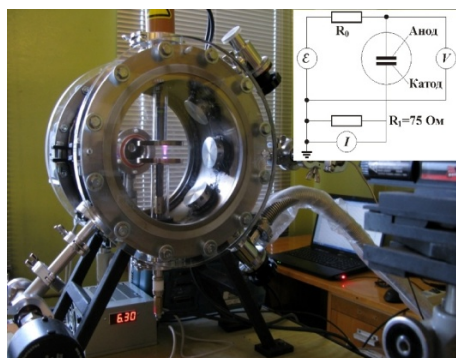
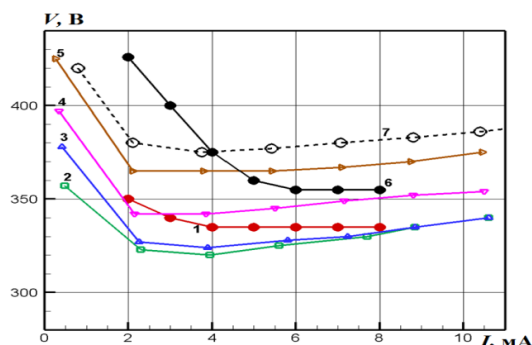


Рис. 1. Установка НТП

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

данных позволил идентифицировать НТП и быстро находить области существования квазистационарной газоразрядной плазмы в экспериментах.

Лабораторная установка ГУАТ

В аэродинамическом блоке ГУАТ [1], объемом 800 л, модели различных форм обтекаются газовыми потоками в широких диапазонах чисел Маха. В соответствии с принципом действия в ГУАТ ударная волна переотражается от торцов и при каждом торможении ее у входа в сопло происходит истечение потока на модель, что в дальнейшем влияет на физическую картину существования разряда.

Проведены экспериментальные исследования модели плоского канала, снабженной высоковольтными электродами. На Рис. 3–5 показаны: фрагмент ГУАТ, высокоскоростная камера перед иллюминатором и модель перед соплом.

Разряд зажигается не только в азоте, но и в воздухе при давлении 5 Torr, напряжении 2 кВ и токе 5 мА. В неподвижном воздухе разряд стабильно горит до момента снижения давления менее 3 Torr. Физические картины экспериментов в ГУАТ и на установке НТП соответствовали друг другу, при этом разрядный столб не совершал движения, и его поперечное сечение не меняло своего мини-

мального значения.

При истечении потока со скоростью $= 2,94$ на модель, разрядный столб выгнулся по потоку, затем разорвался. При переотражении ударной волны в ударной части ГУАТ в аэродинамической части в области разряда происходило следующее. Когда к соплу подходила волна разрежения, в аэродинамическом блоке разряд вспыхивал снова, затем после изменения давления потока на модель он трансформировался. Все эти процессы регистрировала видеокамера с длительностью одного кадра 300 мкс при приемлемом разрешении, притом, что длительность кадра может быть уменьшена на порядок. На Рис. 6 приведены кадры видеосъемки горения разряда в развитии в положении видеокамеры у иллюминатора.

При регистрации теневой картины ударно-волновых структур видеокамера не «видит» разряд через теплер, а без теплера видеокамера в положении рис. 4 регистрирует разряд, но не «видит» ударно-волновых конфигураций. Теневая картина в развитии показана на рис. 7.

Погрешность регистрации давлений в пробке торможения ударной волны ГУАТ перед соплом составили 1,6% и 5,7%. Сравнение структур показало небольшое увеличение расстояния фронта ударной структуры от модели.

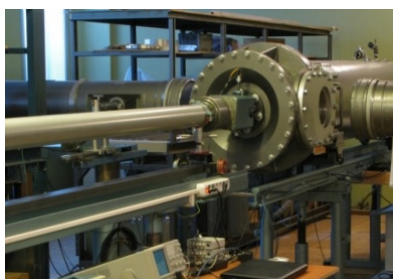


Рис. 3. ГУАТ

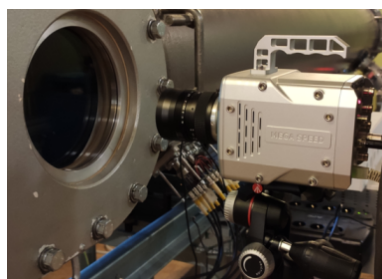


Рис. 4. Видеорегистрация

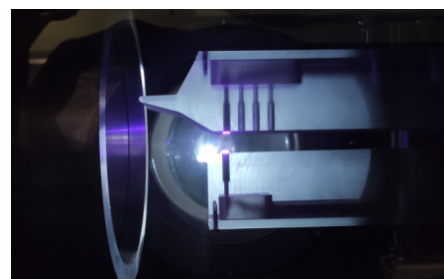


Рис. 5. Модель

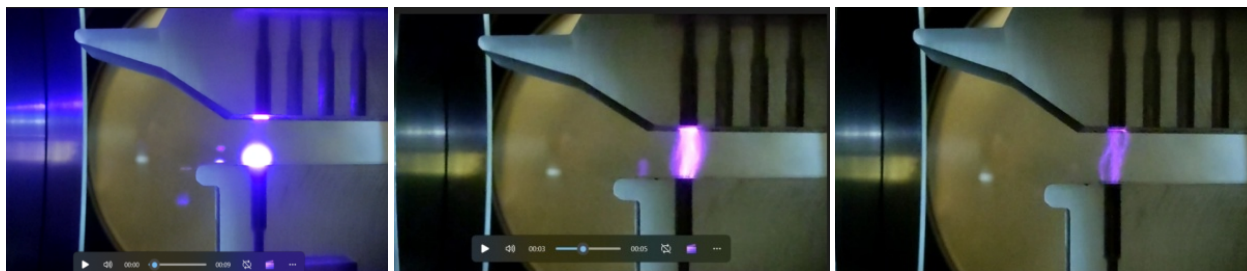


Рис. 6. Разряд в потоке ГУАТ



Рис. 7. Теневая картина в развитии

Выводы

Эксперименты с газоразрядной плазмой в неподвижной среде и в скоростном потоке показали согласие по формированию параметров нормального тлеющего разряда. Отмечено устойчивое горение при давлениях среды: 3–8 торр и токе 3–5 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 соплом показали трансформацию разряда при квазистационарном и нестационарном обтекании моделей воздушным потоком.

Список литературы

- [1] *Shang J.J.S., Surzhikov S.T.* Plasma Dynamics for Aerospace Engineering. 2018. Cambridge University Press, 388 с. doi: 10.1017/9781108292566.
- [2] *Surzhikov S.T.* Theoretical and Computational Physics of Gas Discharge Phenomena. 2020. De Gruyter. (Berlin, New York.- 537 с. doi: 10.1515/9783110648836.
- [3] *Surzhikov S.T.* Comparative Analysis of the Parameters of the Normal and Abnormal DC Glow Discharges//Plasma Physics Reports. 2022. С. 1261-1272. doi: 10.1134/s1063780x22700337.
- [4] *Surzhikov S.T. and etc.* Normal Glow Discharge: Comparison of Calculated and Experimental Data//Interperiodica Publishing. 2019. С. 154-158. doi: 10.1134/s1028335819040049.
- [5] *Дорощенко И.А. и др.* Исследования плазодинамических процессов наносекундного диапазона при формировании ударных волн от импульсных разрядов // ЖТФ. М.2018. С.684-691.
- [6] *Стариковский А.Ю., Александров Н.Л.* Управление газодинамическими потоками с помощью сверхбыстрого локального нагрева сильнонеравновесной импульсной плазме. 2006, 102 с. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2006/2006.11681.pdf>