

УДК 537.523.3;532.517.4

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО КОРОННОГО РАЗРЯДА В ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУЕ

© 2011 г.

А.Б. Ватажин

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва

vatazhin@ciam.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Выполнено экспериментальное и теоретическое исследование частотных характеристик отрицательного коронного разряда в нагретой турбулентной газодинамической струе. Эксперименты проводились на установке, где создавался коронный разряд в турбулентной струе воздуха при изменении его скорости и температуры на срезе сопла в диапазонах 0–250 м/с и 290–650 К и в широком диапазоне изменения потенциала коронирующей иглы (напряжения разряда). Рассчитаны поля скорости и температуры в турбулентной струе и определены ее газодинамические частоты.

Описан дискретный режим движения ионной компоненты в отрицательном разряде, обусловленный особенностями его структуры во внутренней ионизационной зоне и характеризующийся «электрическим» частотным спектром. Получены зависимости доминирующей электрической частоты разряда от скорости и температуры газа на срезе сопла и напряжения коронного разряда.

Ключевые слова: отрицательный коронный разряд, горячая турбулентная струя, дискретная модель разряда, частотные характеристики разряда.

Известно, что движение ионной компоненты в отрицательном коронном разряде осуществляется отдельными сгустками [1] и, наряду с общепринятой континуальной моделью разряда, разрабатываются «дискретные» модели (например, [2]), необходимые, при исследовании частотных характеристик объекта, в котором происходит разряд.

Цель настоящего исследования – обобщение дискретной модели коронного разряда на более широкий диапазон температур и скоростей газа в турбулентной струе, в которую помещен разряд.

Проведено экспериментальное исследование коронного разряда в турбулентной струе воздуха на установке, показанной на рис. 1, где 1 – сопло, 2 – коронирующая игла отрицательного коронного разряда, 3 – отрицательные ионы разряда в межэлектродном промежутке, 4 – нагретая турбулентная струя, 5 – прозрачная для газа сетка – второй электрод коронного разряда, u_0 и T_0 – скорость и температура газа на срезе сопла, J – электрический ток разряда, ϕ – модуль разности потенциалов между иглой 2 и сеткой 5, расстояние l между которыми составляло 12,5 см.

Струя истекала во внешнее воздушное пространство с атмосферным давлением. На срезе сопла измерялись давление и температура тор-

можения газа, что позволило рассчитать все начальные характеристики развивающейся турбулентной струи. Параметры турбулентной струи в межэлектродном пространстве рассчитывались с использованием модели [3]. (Обратное влияние электрических эффектов на осредненное движение струи было несущественно.) Характерная частота газодинамических пульсаций в струе на ее автомодельном участке, по порядку величины равная отношению средней скорости струи к ее диаметру, в сечении расположения сетки 5 оказалась на уровне сотен герц.

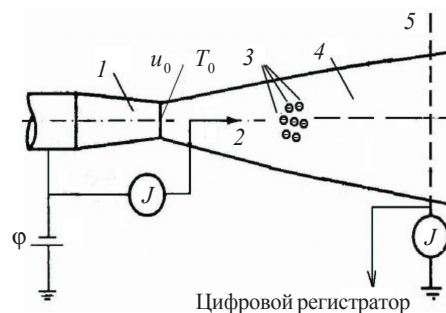


Рис. 1

При равной нулю скорости истечения газа из сопла рассматривался режим «ионного ветра», когда возникает газодинамическое течение в результате передачи импульса от движущихся в электрическом поле ионов нейтральным молекулам

воздуха. Согласно оценкам, скорость ионного ветра в условиях экспериментов была на уровне 3 м/с.

Для каждого газодинамического режима, характеризующегося скоростью u_0 и температурой T_0 на срезе сопла, при каждом потенциале ϕ коронного разряда были измерены средний ток с иглы 2 и средний ток на сетку 5, а также получены путем обработки временных реализаций для этих величин их спектры и найдены доминирующие частоты в спектрах. Указанные токи оказались равны друг другу, что свидетельствует об отсутствии утечек тока из межэлектродного промежутка. Также оказались совпадающими доминирующие частоты. Поэтому для тока и частоты были использованы единые обозначения J и f . Средний «эффективный» заряд Q движущихся в межэлектродном промежутке ионных сгустков приближенно равен $Q = J/f$.

Приближенное выражение для доминирующей частоты f пульсаций коронного разряда в сечении сетки 5 было найдено с помощью теории подобия и размерностей:

$$f = \frac{E_* b}{I} \left[\left(\frac{\phi - \phi_*}{\phi_*} \right) G_1(\Gamma) + \frac{v}{b E_*} \left(\frac{\phi - \phi_*}{\phi_*} \right) G_2(\Gamma) \right].$$

Здесь E_* – электрическое поле зажигания коронного разряда на поверхности коронирующей иглы (на ее «кончике»), ϕ_* – потенциал зажигания разряда, b и v – характерные подвижность ионов и скорость газа, $G_1(\Gamma)$ и $G_2(\Gamma)$ – функции геометрических параметров и коэффициентов, входящих в выражения для газодинамических величин. Принимая $E_* = 100$ кВ/см, $\phi_* = 3$ кВ/см, $\phi = 7$ кВ/см, $b = 2$ см²/В·с и считая G_1 и G_2 величинами порядка единицы, приходим к выводу, что частота коронного разряда составляет несколько десятков килогерц. (Данные о величине E_* , которая резко возрастает при уменьшении радиуса коронирующей иглы, приведены в [4].)

Частоты f коронного разряда в сечении электрода 5 экспериментально находились в широком диапазоне изменения определяющих параметров ($0 \leq u_0 \leq 250$ м/с, $290 \leq T_0 \leq 650$ К). Некоторые экспериментальные данные представлены на рис. 2, где построены возрастающие зависимости частоты f от потенциала ϕ коронно-

го разряда при различных газодинамических условиях на срезе сопла. Кривым 1–3 соответствуют условия: $u_0 = 0$, $T_0 = 293$ К; $u_0 = 111$ м/с, $T_0 = 382$ К; $u_0 = 250$ м/с, $T_0 = 569$ К. Анализ всех полученных экспериментальных данных показал, что частота разряда, при умеренной температуре составляющая 20...30 кГц (при напряжении на коронирующей игле $\phi = 7$ кВ), возрастает до 70...80 кГц с увеличением температуры струи. Частота незначительно изменяется при варьировании скорости в диапазоне $u_0 > 20$ м/с и существенно увеличивается с ростом напряжения разряда: при $\phi = 10$ кВ (и $T_0 = 293$ К) она достигает 70 кГц.

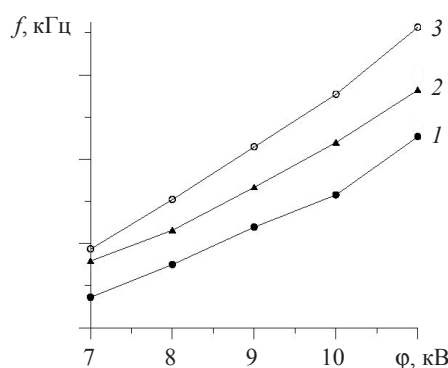


Рис. 2

Авторский коллектив: С.Л. Вавиловская, А.Б. Ватажин, Д.А. Голенцов, А.Г. Гулин, В.А. Лихтер, Е.К. Холщевникова.

Работа проведена при финансовой помощи РФФИ (проект №08-01-00142) и по программе Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-319.2008.1).

Список литературы

1. Капцов Н.А. Коронный разряд и его применение в электрофильтрах. М.-Л.: Гостехиздат, 1947. 226 с.
2. Варенцов О.К., Ватажин А.Б., Фармазян В.В. «Сгустковая» модель коронного разряда в газодинамическом потоке // Изв. АН СССР. МЖГ. 1986. №1. С. 153–160.
3. Козлов В.Е., Секундов А.Н., Смирнова И.П. Модели турбулентности для описания течения в струе сжимаемого газа // Изв. АН СССР. МЖГ. 1986. №6. С. 38–44.
4. Верещагин И.П., Левитов В.И., Мирзабекян Г.З., Пашин М.М. Основы электрогазодинамики дисперсных систем. М.: Энергия, 1974. 480 с.

NEGATIVE CORONA FREQUENCIES IN A TURBULENT JET

A.B. Vatazhin

Experimental and theoretical research of negative corona frequencies in hot turbulent air jet was carried out. Experiments were conducted using a facility where a negative corona discharge was created in a turbulent air jet with the changes of its velocity and temperature at the nozzle cross-section in the ranges of 0–250 m/s and 290–650 K and in a wide range changing of the potential of the corona needle. Fields of velocity and temperature in a turbulent jet were calculated and its gas-dynamic frequencies were determined. The discrete mode of ionic component moving in the negative corona, caused by features of its structure in the internal ionization zone and characterized by its «electric» frequency spectrum was described. Dependencies of corona dominating frequency on the velocity and temperature of the gas and on the corona potential are obtained.

Keywords: negative corona, hot turbulent jet, corona discrete model, negative corona frequencies.