ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР, 2021, том 59, № 1, с. 22–30

УДК 533.9.03.537.5

ВЛИЯНИЕ МЕЖЭЛЕКТРОДНОГО РАССТОЯНИЯ НА ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ПОПЕРЕЧНО-ПРОДОЛЬНОГО РАЗРЯДА В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ГАЗОВЫХ ПОТОКАХ

© 2021 г. А. А. Логунов[1], К. Н. Корнев[1], Л. В. Шибкова[1], В. М. Шибков[1, *]

[1]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

**E-mail: shibkov@phys.msu.ru*

Поступила в редакцию 02.08.2019 г.
После доработки 16.04.2020 г.
Принята к публикации 18.06.2020 г.

Реализован нестационарный поперечно-продольный электродный разряд, создаваемый в широком диапазоне изменения внешних условий: скорость воздушного потока изменялась от 150 до 550 м/с, минимальное межэлектродное расстояние – от 0.2 до 0.8 мм, максимальное значение пульсирующего разрядного тока – от 5.5 до 16 А. Показано, что увеличение разрядного тока ведет к росту максимально достижимой длины плазменного канала и уменьшению продольного электрического поля и частоты пульсации плазменной петли. Увеличение межэлектродного расстояния приводит к росту напряжения на разряде, длины плазменного канала и продольной напряженности электрического поля в плазме, тогда как частота пульсации напряжения на разрядном промежутке, разрядного тока и плазменной петли уменьшается. Увеличение скорости потока ведет к росту напряженности электрического поля в плазме и частоты пульсации разряда, тогда как падение напряжения на разряде не зависит от скорости потока, а полная длина плазменной петли уменьшается. Показано, что добавление пропана в воздушный поток существенно изменяет зависимость частоты пульсации плазменной петли от скорости потока, разрядного тока и эквивалентного отношения пропана в топливной смеси.

DOI: 10.31857/S0040364421010117

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время интенсивно развивается новое направление в физике плазмы – плазменная аэродинамика. При этом для улучшения аэродинамических характеристик летательных аппаратов предлагается с помощью электрических разрядов создавать перед ними и на их несущих поверхностях плазменные образования. Плазменная технология используется также для целей уменьшения времени воспламенения горючего, управления процессом сверхзвукового горения и его стабилизации в прямоточном воздушно-реактивном двигателе. С начала 1960-х годов проводятся исследования параметров низкотемпературной плазмы, создаваемой в сверхзвуковых потоках воздуха. Основополагающими работами в области плазменной аэродинамики являются исследования свойств поперечных электрических разрядов постоянного тока в сверхзвуковых потоках воздуха [1, 2]. Влияние высокоскоростного течения на свойства продольного разряда анализировалось в [3], где рассмотрены вопросы, связанные с возможностью существования продольного разряда в случае, когда дрейфовая скорость положительных ионов, движущихся от анода к катоду, становится соизмеримой со скоростью потока, распространяющегося в противоположном направлении. С целью воспламенения углеводородных топлив в условиях сверхзвукового воздушного потока применяются различного типа разряды, в частности импульсные поперечные разряды постоянного тока [4, 5], свободно локализованные СВЧ-разряды, создаваемые в сфокусированном пучке электромагнитного излучения [6, 7], а также поверхностный СВЧ-разряд, создаваемый на диэлектрической антенне [8–11]. В работах [12–14] изучается возможность применения для воспламенения углеводородного топлива высоковольтных наносекундных разрядов. Проведено также исследование горения при одновременном воздействии на газ ударной волны и импульсного неравновесного разряда. В [15] рассмотрена возможность использования конструкции плазменных генераторов на основе факельного разряда в качестве воспламенителя этилена и авиационного керосина в камере сгорания прямоточного воздушно-реактивного двигателя. В работах [16–20] предложно использовать поперечно-продоль-

ный пульсирующий в потоке воздуха разряд для стабилизации горения углеводородного топлива.

В настоящей статье изучаются основные характеристики нестационарного поперечно-продольного электродного разряда, создаваемого в дозвуковых и сверхзвуковых многокомпонентных газовых потоках. При включении источника постоянного напряжения по кратчайшему расстоянию между катодом и анодом происходит пробой воздуха. Образующаяся плазменная перемычка начинает сноситься высокоскоростным воздушным потоком. Плазменный канал, скользящий в направлении потока вдоль горизонтально расположенных электродов, удлиняется и искривляется. Через некоторое время концы плазменной перемычки фиксируются на концах анода и катода, а плазменный канал продолжает вытягиваться в виде петли вниз по направлению распространения потока. При этом в анодной части плазменного канала дрейфовая скорость движения ионов совпадает по направлению со скоростью потока, тогда как в катодной части петли скорость дрейфа положительных ионов противоположна направлению распространения потока. Длина канала увеличивается, падение напряжения на нем растет и может превысить пороговое пробойное значение. После этого по кратчайшему расстоянию между электродами происходит новый пробой, и процесс повторяется периодически с некоторой частотой. В работе исследуется влияние минимального межэлектродного расстояния на максимально достижимое перед повторным пробоем напряжение на разрядном промежутке, на напряженность продольного электрического поля в плазменной петле, на длину разрядного канала, частоту пульсаций напряжения и разрядного тока. Рассматривается влияние скорости потока на частоту пульсаций разряда при различных составах пропан-воздушной смеси и значениях разрядного тока.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследования поперечно-продольного разряда, создаваемого в двух конфигурациях, проводились на экспериментальной установке, подробно описанной в предыдущих работах [16–19]. Установка включает в себя вакуумную камеру с внутренним диаметром 1 м и длиной 3 м, систему для создания высокоскоростного потока, высоковольтный источник питания постоянного тока, систему синхронизации и диагностическую аппаратуру. Система хранения воздуха высокого давления состоит из газгольдера объемом 0.56 м^3 с компрессором, поднимающим давление воздуха в ресивере до p = 1–5 атм.; клапана высокого давления; детектора для измерения динамического давления; электромагнитного клапана с временем срабатывания t ~ 0.05 с, обеспечивающего длительность пуска τ = 0.5–3.0 с. Массовый расход воздуха в эксперименте мог изменяться от 40 до 150 г/с. Система накопления и хранения газообразного горючего состоит из стандартного баллона объемом 0.04 м^3, содержащего жидкий пропан. Через запорный клапан и редуктор уже газообразное топливо поступает в ресивер объемом 0.012 м^3. При открытии клапана воздух и пропан поступают в смеситель, установленный в дозвуковой части канала. Смешение происходит в основном до критического сечения сверхзвукового сопла Лаваля. Секундный массовый расход пропана в эксперименте мог изменяться от 3 до 6 г/с. Эквивалентное отношение для пропана, равное отношению доли пропана в топливе к его доле в стехиометрической смеси, изменялось от 0.5 до 1.7.

В первой серии экспериментов электродный разряд формировался на поверхности диэлектрической пластины, обтекаемой высокоскоростной воздушной струей. Во второй серии изучался пульсирующий разряд, генерируемый в высокоскоростном воздушном потоке внутри аэродинамического канала.

В первой конфигурации разряд создавался на верхней поверхности тефлоновой пластины. Пластина плотно пристыковывалась к сопловому блоку, так что ее верхняя поверхность являлась продолжением нижней стенки прямоугольного сопла Лаваля. Данная система помещалась в открытую барокамеру при атмосферном давлении воздуха. Истекающая из сопла высокоскоростная воздушная струя распространялась вдоль верхней поверхности пластины. На рис. 1 представлено схематическое изображение блока питания *3–5*, электродной системы *1* и плазменной петли *2* пульсирующего поперечно-продольного разряда (вид в направлении, перпендикулярном поверхности пластины).

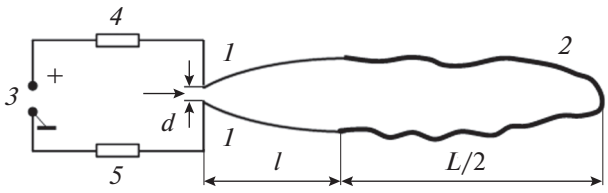

Рис. 1. Схематическое изображение блока питания, электродной системы и плазменной петли пульсирующего поперечно-продольного разряда: *1* – электродный узел (анод вверху, катод внизу), *2* – плазменная петля, *3* – источник питания постоянного тока, *4* – балластное сопротивление, *5* – сопротивление для измерения разрядного тока; *l* – продольная длина электродов, *L* – полная длина плазменного канала; стрелкой показано направление распространения воздушной струи.

На пластине заподлицо с ее поверхностью монтировались два хорошо обтекаемых медных электрода *1* специальной конфигурации [16]. Длина электродов одинакова и составляет $l = 33$ мм. Электроды располагались симметрично относительно оси распространения воздушной струи. Максимальная толщина электродов не превышала 1 мм, а ширина – 5 мм. Кратчайшее расстояние между электродами d можно было изменять ступенчато от 0.1 до 1 мм. Расстояние определялось с помощью набора эталонных пластин с шагом 0.1 мм. Максимальное расстояние между анодом и катодом равно 20 мм. Массовый расход воздуха в эксперименте мог изменяться от 40 до 125 г/с. Расход пропана варьировался от 3 до 5.5 г/с. Вакуумная система позволяла проводить эксперименты в диапазоне давлений воздуха в разрядной камере от 10 до 760 Тор. Данная серия экспериментов проводилась в открытой барокамере при атмосферном давлении воздуха.

Во второй серии экспериментов исследовался поперечно-продольный разряд, создаваемый в дозвуковых и сверхзвуковых потоках воздуха между двумя электродами, смонтированными внутри расширяющегося аэродинамического канала [17–22]. Электроды располагались симметрично относительно оси аэродинамического канала и не касались его стенок. Минимальное расстояние между электродами не изменялось и было равно 0.2 мм. Длина электродов $l = 65$ мм. Продольная длина канала – 50 см. Отношение выходного сечения $S_2 = 38$ см^2 к входному сечению $S_1 = 3$ см^2 канала $S_2/S_1 = 12.7$. Вторая серия экспериментов также проводилась в открытой барокамере при атмосферном давлении воздуха. Пульсирующий разряд создается с помощью стационарного источника питания с выходным напряжением $U = 4.5$ кВ и внутренним сопротивлением $r = 100$ Ом. В электрическую цепь последовательно включены источник питания, балластное сопротивление, величина которого могла ступенчато переключаться в пять фиксированных позиций $R_4 = 145$–675 Ом, безындукционное сопротивление $R_5 = 0.32$ Ом, служащее для измерения разрядного тока, и разрядный промежуток. Эксперименты проводились при пяти значениях максимального пульсирующего тока 5.5, 9.8, 12.5, 14.5 и 15.5 А. Длительность импульса напряжения изменялась от 0.5 до 2 с.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для измерений использовался диагностический комплекс, состоящий из цифровых спектрографов, осциллографов, фото- и видеокамер, фотоэлектронных умножителей, электрических зондов, тензовесов, датчиков давления, персональных компьютеров. Основные параметры пульсирующего разряда определялись с помощью автоматизированной системы сбора и обработки информации, позволяющей в масштабах реального времени проводить регистрацию спектров излучения газоразрядной плазмы, сигналов от электрических зондов, импульсных датчиков давления, термопарных датчиков, фотоэлектронного умножителя, тензодатчиков, безындукционного малого сопротивления, высоковольтного безындукционного делителя. Безындукционное сопротивление $R_5 = 0.32$ Ом использовалось для регистрации осциллограммы разрядного тока. Временнóй ход падения напряжения на разрядном промежутке измерялся с использованием безындукционного делителя напряжения с коэффициентом деления $k = 8760$. Процесс развития плазменной петли фиксировался с использованием цифровой видеокамеры “ВидеоСпринт” с электронно-оптическим затвором и цифрового фотоаппарата D50. Съемка проводилась при частоте повторения кадров 6024 Гц с временем экспозиции одного кадра 2 мкс.

С помощью высокоскоростной видео- и фотосъемки, зондового метода, осциллографии, фотоэлектронного умножителя определялась динамика разряда: изменение во времени длины плазменного канала, скорости его распространения, частоты и, соответственно, периода пульсаций разряда, частоты пульсации интенсивности свечения, частоты пульсаций напряжения на разряде и разрядного тока, напряженности электрического поля. Средняя по длине плазменного канала напряженность электрического поля вычислялась по формуле $E = U/L$, где U и L – падение напряжения на плазменном канале и его полная длина. Длина L в различные моменты времени существования пульсирующего разряда определялась с помощью высокоскоростной видеосъемки, позволяющей регистрировать общий вид разряда. В [19] показано, что средняя по длине плазменного канала напряженность электрического поля остается практически постоянной в течение развития одной плазменной петли. Поэтому в данной серии экспериментов вычисления E проводились для момента времени, когда падение напряжения на разряде достигает максимального значения, при этом плазменный канал – максимальной длины. Полученные результаты сравнивались с данными, полученными в работе [23], в которой проводилась регистрация временнóго хода плавающих потенциалов $\varphi(t)$ с помощью двух подвижных зондов, расстояние между которыми было фиксировано $a = 7$ мм. Напряженность продольного электрического поля в катодной и анодной частях плазменной петли определялась по формуле $E(t) = \Delta\varphi(t)/a$. Полученные результаты достаточно хорошо согласуются друг с другом. Однако применение зондового метода измерения при больших значениях потенциалов плазмы (особенно в анодной части плазменной

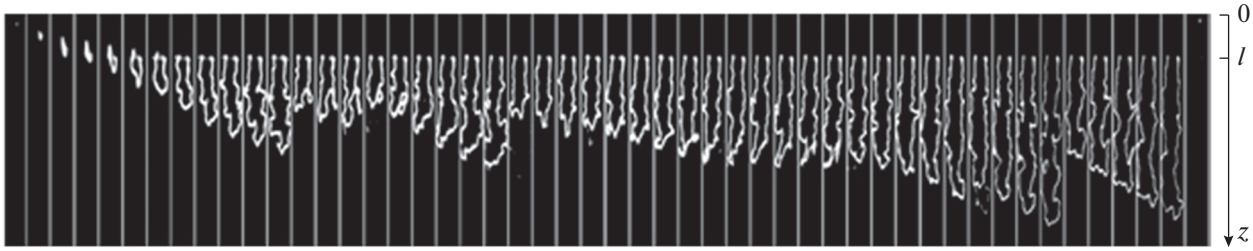

Рис. 2. Динамика развития плазменной петли пульсирующего разряда в дозвуковой воздушной струе: направление времени слева направо; распространение струи сверху вниз со скоростью $\upsilon = 245$ м/с; максимальный разрядный ток $i = 15.5$ А, $d = 0.7$ мм; время экспозиции одного кадра – 2 мкс; временнóй интервал между кадрами – 167 мкс.

петли) затруднительно, требуется применять оптические развязки для защиты измерительной аппаратуры. Поэтому в данной работе продольное электрическое поле определялось по измеренному падению напряжения на разряде и регистрации полной длины канала.

Частота пульсаций разряда является важной характеристикой, определяющей режим поддержания горения топливных смесей в высокоскоростных потоках. В экспериментах частота пульсаций разряда находилась тремя способами. В первом с помощью скоростной цифровой видеокамеры проводилась съемка нестационарного пульсирующего разряда. За один пуск регистрировалось до двенадцати тысяч кадров. Обработка полученных данных позволяла получить время развития каждой из зарегистрированных плазменных петель и соответственно среднюю частоту пульсации разряда. Второй метод заключается в регистрации осциллограмм напряжения и разрядного тока, а также свечения плазмы с последующим подсчетом числа повторных пробоев за фиксированное время. Третий метод применялся при определении высоких частот пульсаций разряда, создаваемого в сверхзвуковых потоках газа, или при наличии нескольких повторных пробоев. В этом случае проводилась математическая обработка осциллограмм тока и напряжения на разряде с использованием стандартной процедуры фурье-преобразования и определялась основная частота пульсаций и ее гармоники. Все три метода дают достаточно хорошо совпадающие результаты, если учесть нестабильность разряда, создаваемого в турбулентном высокоскоростном воздушном потоке.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При включении источника питания по кратчайшему расстоянию d между катодом и анодом происходит пробой воздуха (вверху первого кадра слева на рис. 2). Образующаяся при этом плазменная перемычка начинает сноситься высокоскоростным воздушным потоком. Длина плазменного канала, скользящего вдоль электродов, увеличивается и искривляется. Воздушная струя распространяется вдоль направления z. Координате $z = 0$ соответствует точка минимума расстояния между катодом и анодом, координате $z = l$ – плоскость, в которой оканчиваются электроды. В условиях данного эксперимента ($\upsilon = 245$ м/с, $i = 15.5$ А, $d = 0.7$ мм) точка скольжения плазменной перемычки вдоль анода (на всех кадрах рис. 2 справа) движется приблизительно на 20 м/с быстрее точки скольжения канала вдоль катода. При этом скорости перемещения анодного и катодного пятен вдоль электродов меньше, чем скорость центральной части плазменной петли. Анодное пятно в условиях данного эксперимента приблизительно через 0.6 мс после возникновения между электродами плазменного образования (рис. 2) достигает конца анода и фиксируется на нем. Затем еще через 0.5 мс после этого на конце второго электрода фиксируется катодное пятно. Плазменный канал продолжает вытягиваться в виде петли вниз по направлению распространения потока. Длина канала увеличивается, падение напряжения на нем растет и может превысить пороговое пробойное значение. После этого по кратчайшему расстоянию между электродами происходит новый пробой (вверху последнего кадра справа на рис. 2), и процесс повторяется периодически с некоторой частотой.

В условиях данного эксперимента период пульсации разряда составляет 8.3 мс, чему соответствует частота пульсаций плазменной петли 120 Гц. В течение всего времени существования плазменной петли на рис. 2 отчетливо наблюдаются ярко светящиеся области на концах электродов (координата $z = l$), что соответствует катодному и анодному пятнам с высокими значениями температуры газа и концентрации электронов. В экспериментах могут реализовываться два режима поддержания разряда. В первом случае плазменная петля достигает максимально возможной длины без промежуточных повторных пробоев. Во втором случае в течение развития одной петли реализуется несколько дополнительных повторных пробоев (на рис. 2 реализуются три дополнительных пробоя в течение развития

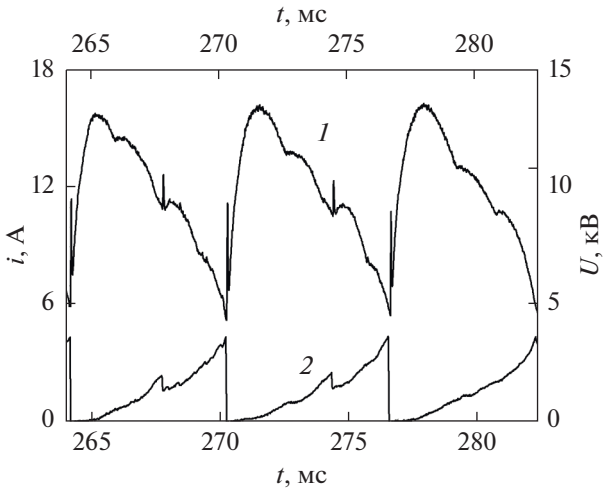

Рис. 3. Фрагмент осциллограмм тока (*1*) и напряжения (*2*) на разрядном промежутке.

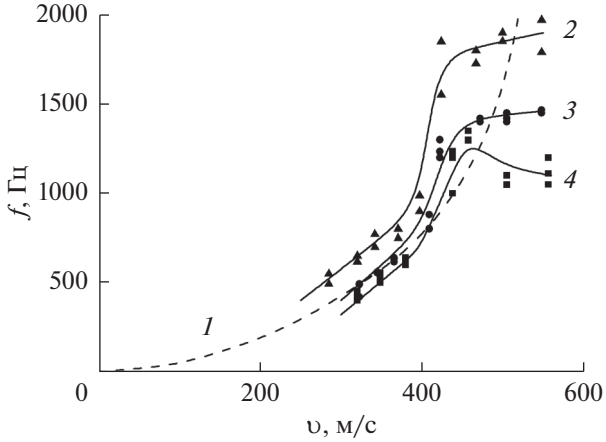

Рис. 4. Зависимость частоты пульсаций разряда от скорости потока воздуха (*1*) и пропан-воздушного потока при постоянном расходе пропана 4.4 г/с и различных максимальных значений пульсирующего тока: *2* – 5.5 А, *3* – 12.5, *4* – 15.5.

одной плазменной петли: 12-й, 21-й и 44-й кадры). В обоих режимах процесс формирования разрядной петли в потоке периодически повторяется, т.е. данный разряд, создаваемый в движущемся воздухе с помощью стационарного источника питания, представляет собой нестационарный пульсирующий поперечно-продольный разряд.

В качестве примера на рис. 3 приведен фрагмент длительностью 18 мс осциллограмм тока *1* и напряжения *2*, произвольно выбранный из полного времени пуска 2 с. Минимальное расстояние между анодом и катодом $d = 0.7$ мм. Скорость воздушной струи $\upsilon = 170$ м/с.

Видно, что глубина модуляции напряжения *2* на разрядном промежутке достигает 100%. В данных условиях (третья петля на рис. 3) напряжение в процессе развития петли постепенно нарастает до максимального значения $U = 3.6$ кВ, после чего по минимальному расстоянию между катодом и анодом происходит повторный пробой, а напряжение падает практически до нуля. В этот момент времени на осциллограмме тока наблюдаются кратковременные униполярные пики, что связано с формированием в стадии пробоя пучка быстрых электронов [18, 24]. Возможны также дополнительные пробои между анодной и катодной частями плазменного канала (первая и вторая петли). В эти моменты времени также формируются пучки быстрых электронов. При этом напряжение на разрядном промежутке не падает до нуля, а остается приблизительно на уровне 1.5 кВ. Максимальное значение разрядного тока *i* достигает величины порядка 16 А, в то время как минимальное значение тока порядка 6 А, т.е. глубина его модуляции – 62%. Особенно следует отметить, что разрядный ток в течение всего пуска длительностью 2 с никогда не падает до нуля. Вначале происходит новый пробой между электродами, образующаяся плазма обладает высокой электропроводностью и шунтирует предыдущую плазменную петлю, которая начинает распадаться и сносится вниз по потоку. С увеличением скорости воздушной струи глубина модуляции тока уменьшается, и при $\upsilon = 550$ м/с изменение *i* в процессе развития каждой петли не превышает 5% от максимального значения 16 А.

Зависимость частоты пульсаций поперечно-продольного разряда, генерируемого внутри расширяющегося аэродинамического канала (вторая конфигурация создания разряда), от скорости воздушного потока представлена на рис. 4.

Экспериментально получено, что при любых значениях скорости потока воздуха увеличение разрядного тока от 5.5 до 15.5 А приводит к незначительному, порядка 10%, изменению частоты пульсации разряда. Поэтому на рис. 4 кривая *1* представляет собой аппроксимацию, полученную усреднением экспериментальных значений частоты пульсации разряда при различных токах для каждого значения скорости потока. В эксперименте наблюдается сильная зависимость частоты пульсации разряда от скорости воздушного потока. Видно, что увеличение скорости воздушного потока от 100 до 520 м/с приводит к монотонному росту частоты пульсаций плазменной петли от 100 до 2000 Гц.

Параметры пульсирующего разряда изучались также при различных составах топливовоздушной смеси. На рис. 4 представлена зависимость частоты пульсаций разряда от скорости пропан-воздушного потока при различных максимальных значениях пульсирующего тока. В воздушный поток добавляется пропан с постоянным расходом 4.4 г/с. В этом случае зависимость ча-

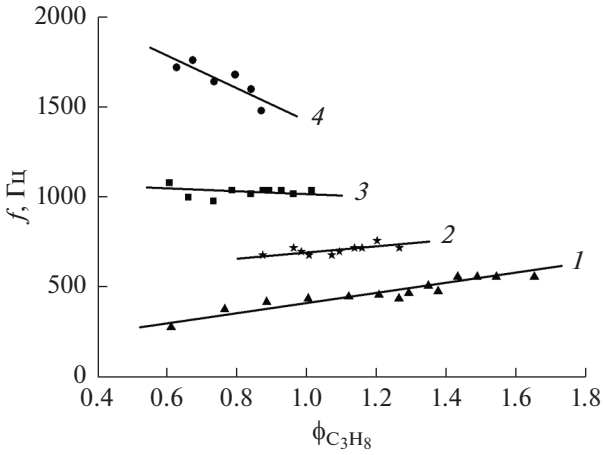

Рис. 5. Зависимость частоты пульсаций от эквивалентного отношения для пропана при скорости пропан-воздушного потока: *1* – 275 м/с, *2* – 370, *3* – 430, *4* – 470; разрядный ток: *1*, *2* – 15.5 А; *3*, *4* – 9.8.

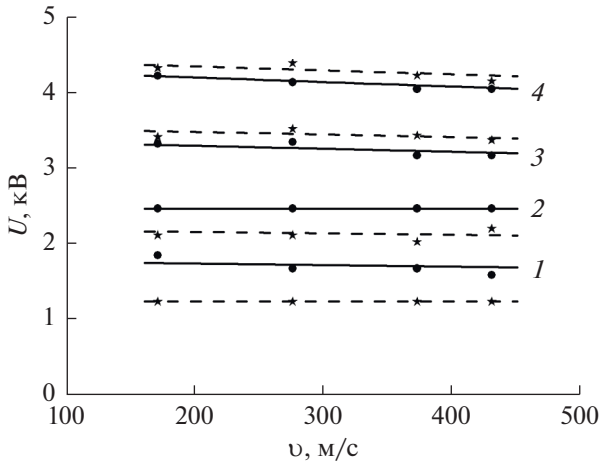

Рис. 6. Зависимость максимально достижимого напряжения на разрядном промежутке от скорости воздушного потока при разрядном токе 5.5 А (сплошные прямые) и 14.5 А (штриховые) и различных значениях минимального расстояния между анодом и катодом: *1* – 0.2 мм, *2* – 0.4, *3* – 0.6, *4* – 0.8.

стоты от скорости качественно меняется при переходе через скорость звука в воздухе. При малых скоростях $\upsilon < 400$ м/с частота пульсации разряда близка к частоте пульсации плазменной петли в воздушном потоке. Это соответствует обедненным по отношению к окислителю и, соответственно, обогащенным пропаном топливовоздушным смесям. Известно, что эффективность горения обогащенных пропаном топливных смесей низкая. При этом измеренная в эксперименте тяга, возникающая при горении пропана в воздушном потоке в аэродинамическом расширяющемся канале (продольная длина канала – 50 см, отношение выходного сечения $S_2 = 38$ см^2 к входному сечению $S_1 = 3$ см^2 канала $S_2/S_1 = 12.7$), мала, однако она монотонно возрастает при уменьшении эквивалентного отношения для пропана. При высоких скоростях υ потока (в обедненных топливом смесях) происходит резкое изменение зависимости частоты f от скорости и разрядного тока. Частота осцилляции плазменной петли при $\upsilon > 400$ м/с сильно зависит от разрядного тока, уменьшаясь почти в два раза при увеличении тока от 5.5 до 15.5 А.

Также получена зависимость частоты пульсации плазменной петли от эквивалентного отношения пропана в топливной смеси для двух значений разрядного тока и четырех значений скорости потока. Результаты представлены на рис. 5. При увеличении скорости потока частота пульсаций разряда растет как для обедненных пропаном топливовоздушных, так и для богатых смесей. Следует отметить, что при сверхзвуковой скорости потока $\upsilon = 470$ м/с увеличение эквивалентного отношения ведет к уменьшению частоты пульсаций, а при дозвуковой скорости $\upsilon = 275$ м/с – к ее росту.

На рис. 6 представлены результаты экспериментов по определению степени влияния скорости воздушного потока и минимального расстояния между анодом и катодом на максимально достижимое напряжение на разрядном промежутке, при котором происходит повторный пробой и формируется новая плазменная перемычка. Чтобы не перегружать рисунок, результаты приведены только для двух значений разрядного тока и четырех минимальных расстояний между электродами. При токе 5.5 А увеличение межэлектродного расстояния d от 0.2 до 0.8 мм приводит к росту напряжения на разрядном промежутке от 1.7 до 4.2 кВ, причем при любых скоростях потока максимально достижимое напряжение при фиксированном d остается в пределах точности измерений постоянным. Увеличение разрядного тока при больших $d = 0.8$ мм приводит к незначительному на 100 В росту напряжения, тогда как при малых $d = 0.2$ мм напряжение на разрядном промежутке падает примерно на 500 В.

Следует отметить, что напряженность электрического поля, рассчитанная по формуле $E = U/d$ (U – напряжение, при котором происходит повторный пробой, d – минимальное расстояние между анодом и катодом), равна 72 кВ/см при $d = 0.2$ мм, 57 кВ/см при $d = 0.4$ мм, 55 кВ/см при $d = 0.6$ мм, 52 кВ/см при $d = 0.8$ мм. Так как пробой осуществляется в высокоскоростном потоке воздуха при скорости 150–450 м/с, а для создания продольно-поперечного разряда используется расходящаяся электродная конфигурация, то, как показывают оценки, расстояние, по которому осуществляется пробой воздуха, увеличивается по сравнению с минимальным расстоянием при-

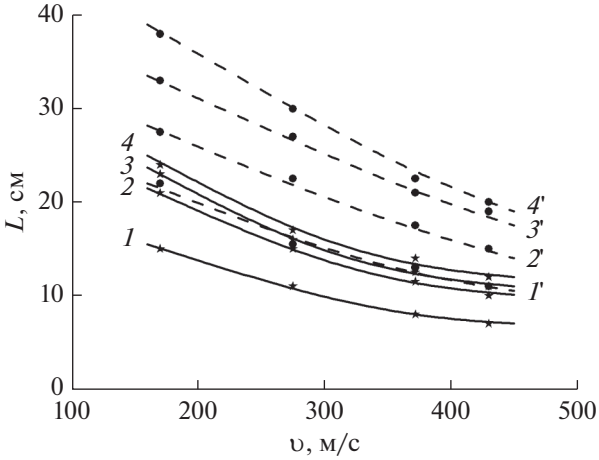

Рис. 7. Зависимость длины плазменного канала от скорости потока воздуха при разрядном токе 5.5 А (сплошные кривые) и 15.5 А (штриховые) и различных значениях минимального расстояния между анодом и катодом: *1*, *1'* – 0.2 мм; *2*, *2'* – 0.4; *3*, *3'* – 0.6; *4*, *4'* – 0.8.

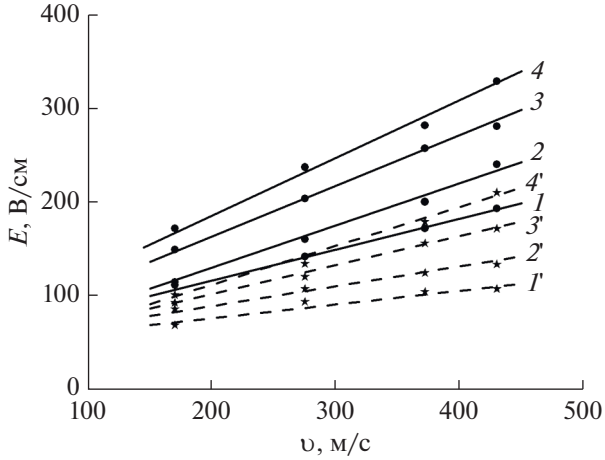

Рис. 8. Зависимость средней по длине канала напряженности продольного электрического поля в плазменной петле от скорости потока воздуха при разрядном токе 5.5 А (сплошные кривые) и 15.5 А (штриховые) и различных минимальных расстояниях между анодом и катодом: *1*, *1'* – 0.2 мм; *2*, *2'* – 0.4; *3*, *3'* – 0.6; *4*, *4'* – 0.8.

близительно в 1.5–2 раза. В этом случае среднее значение электрического поля приближенно равно 35 кВ/см, что близко к пробойному полю в неподвижном воздухе при атмосферном давлении.

Для определения средней по длине плазменного канала напряженности электрического поля наряду с временны́м ходом падения напряжения на разряде необходимо знать зависимость полной длины плазменной петли от времени. Падение напряжения на плазменной петле определялось в каждом конкретном случае по осциллограмме, подобной приведенной на рис. 3. На рис. 7 представлены зависимости полной длины плазменного канала поперечно-продольного разряда от скорости воздушного потока при двух разрядных токах и четырех минимальных расстояниях между электродами.

При всех условиях эксперимента полная длина L плазменного канала, приближенно равная удвоенному расстоянию, на которое распространяется передняя граница плазменной петли, отсчитываемая от плоскости, в которой оканчиваются концы анодного и катодного электродов (см. рис. 1), уменьшается с увеличением скорости воздушного потока. Увеличение разрядного тока от 5.5 до 15.5 А приводит к увеличению L при всех значениях скорости потока и межэлектродного расстояния. Полная длина плазменной петли возрастает также при увеличении минимального межэлектродного расстояния d в диапазоне 0.2–0.8 мм и росте разрядного тока от 5.5 до 15.5 А.

Зависимость средней напряженности продольного электрического поля от скорости воздушного потока представлена на рис. 8. Увеличение скорости потока приводит к росту напряженности поля при всех значениях тока и межэлектродного расстояния. Однако при любой фиксированной скорости потока увеличение разрядного тока ведет к уменьшению продольного электрического поля, тогда как рост минимального межэлектродного расстояния приводит к возрастанию поля.

Следует еще раз подчеркнуть, что данным методом измеряется среднее по длине плазменного канала продольное электрическое поле. В [23] показано, что в анодной части плазменной петли потенциал линейно уменьшается с ростом расстояния z от электрода, а в катодной части – растет, т.е. напряженность электрического поля является постоянной величиной как в анодной, так и в катодной части плазменной петли. При этом напряженность продольного электрического поля E_a в анодной части плазменной петли пульсирующего поперечно-продольного разряда систематически до 35% величины превышает соответствующее значение E_k в катодной части.

На рис. 9 представлены зависимости частоты пульсации нестационарного поперечно-продольного разряда от скорости воздушного потока при различных разрядных токах и минимальных расстояниях между катодом и анодом.

В условиях нестационарного поперечно-продольного электродного разряда, создаваемого в высокоскоростном потоке воздуха или пропан-воздушной смеси синхронно осциллируют плазменная петля, разрядный ток, напряжение на разрядном промежутке, а также свечение плазмы. Причем глубина модуляции свечения плазмы и напряжения на разряде достигает 100%, тогда как глубина пульсации разрядного тока изменя-

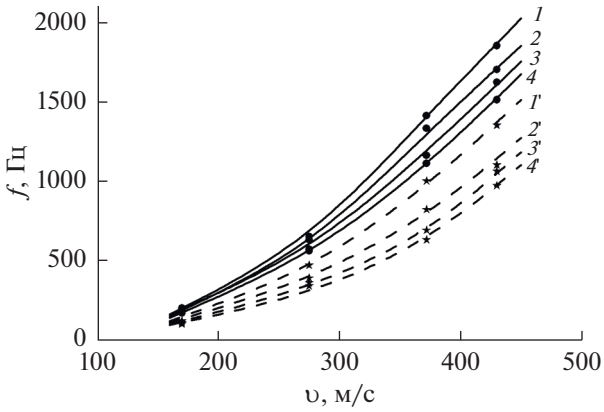

Рис. 9. Зависимость частоты пульсаций плазменной петли от скорости потока воздуха при разрядном токе 5.5 А (сплошные кривые) и 14.5 А (штриховые) и различных минимальных расстояниях между анодом и катодом: *1*, *1'* – 0.2 мм; *2*, *2'* – 0.4; *3*, *3'* – 0.6; *4*, *4'* – 0.8.

ется от 5% при сверхзвуковой скорости потока 600 м/с до 70% при 100 м/с. При этом увеличение скорости потока не влияет на максимальное напряжение на разрядном промежутке, но ведет к уменьшению полной длины пульсирующего плазменного канала и росту продольной напряженности электрического поля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования основных характеристик нестационарного пульсирующего поперечно-продольного электродного разряда. Показано влияние скорости потока, разрядного тока и минимального расстояния между катодом и анодом на максимально достижимую длину плазменного канала, частоту его пульсаций, напряжение пробоя межэлектродного промежутка, напряженность продольного электрического поля.

Полученные результаты необходимы для выбора оптимальных условий создания разряда с целью использования плазменной технологии для управления процессом горения углеводородного топлива в камерах сгорания прямоточного воздушно-реактивного и турбореактивного двигателей.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-02-00336).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алферов В.И., Бушмин А.С.* Электрический разряд в сверхзвуковом потоке воздуха // ЖЭТФ. 1963. Т. 44. № 6. С. 1775.
2. *Алферов В.И., Бушмин А.С., Калачев Б.В.* Исследование процессов горения разряда в потоке газа большой скорости // ЖЭТФ. 1966. Т. 51. Вып. 11. С. 1281.
3. *Пащенко Н.Т., Райзер Ю.П.* Тлеющий разряд в продольном потоке газа // Физика плазмы. 1982. Т. 8. № 5. С. 1086.
4. *Ершов А.П., Сурконт О.С., Тимофеев И.Б., Шибков В.М., Черников В.А.* Поперечные электрические разряды в сверхзвуковых потоках воздуха. Пространственно-временна́я структура и вольт-амперные характеристики разряда // ТВТ. 2004. Т. 42. № 5. С. 669.
5. *Ершов А.П., Калинин А.В., Сурконт О.С., Тимофеев И.Б., Шибков В.М., Черников В.А.* Поперечные электрические разряды в сверхзвуковых потоках воздуха. Микроскопические характеристики разряда // ТВТ. 2004. Т. 42. № 6. С. 856.
6. *Шибков В.М.* Нагрев газа в условиях свободно локализованного СВЧ-разряда в воздухе. Математическое моделирование // ТВТ. 1997. Т. 35. № 5. С. 693.
7. *Шибков В.М.* Нагрев газа в условиях свободно локализованного СВЧ-разряда в воздухе. Эксперимент // ТВТ. 1997. Т. 35. № 6. С. 871.
8. *Шибков В.М., Шибкова Л.В.* Динамика воспламенения тонких пленок спирта в условиях поверхностного сверхвысокочастотного разряда при атмосферном давлении воздуха // ЖТФ. 2009. Т. 79. № 10. С. 65.
9. *Шибков В.М., Шибкова Л.В.* Параметры пламени, возникающего при воспламенении тонких пленок спирта с помощью поверхностного СВЧ-разряда // ЖТФ. 2010. Т. 80. № 1. С. 59.
10. *Шибков В.М., Двинин С.А., Ершов А.П., Константиновский Р.С., Сурконт О.С., Черников В.А., Шибкова Л.В.* Поверхностный сверхвысокочастотный разряд в воздухе // Физика плазмы. 2007. Т. 33. № 1. С. 77.
11. *Шибков В.М., Двинин С.А., Ершов А.П., Шибкова Л.В.* Механизмы распространения поверхностного сверхвысокочастотного разряда // ЖТФ. 2005. Т. 75. № 4. С. 74.
12. *Starikovskaya S.M.* Plasma Assisted Ignition and Combustion // J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. V. 39. № 16. P. R265.
13. *Starikovskii A.Y., Anikin N.B., Kosarev I.N., Mintoussov E.I., Nudnova M.M., Rakitin A.E., Roupassov D.V., Starikovskaia S.M., Zhukov V.P.* Nanosecond-pulsed Discharges for Plasma-assisted Combustion and Aerodynamics // J. Propul. Power. 2008. V. 24. № 6. P. 1182.
14. *Adamovich I.V., Lempert W.R., Rich J.W., Utkin Y.G.* Repetitively Pulsed Nonequilibrium Plasmas for Magnetohydrodynamic Flow Control and Plasma-assisted Combustion // J. Propul. Power. 2008. V. 24. № 6. P. 1198.
15. *Jacobsen L.S., Carter C.D., Baurle R.A., Jackson T., Williams S., Barnett J., Tam C.-J., Bivolaru D.* Plasma-assisted Ignition in Scramjets // J. Propul. Power. 2008. V. 24. № 4. P. 641.
16. *Копыл П.В., Сурконт О.С., Шибков В.М., Шибкова Л.В.* Стабилизация горения жидкого углеводородного топлива с помощью программированного СВЧ-разряда в дозвуковом воздушном потоке // Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 6. С. 551.

17. *Шибков В.М., Шибкова Л.В., Копыл П.В., Логунов А.А.* Стабилизация с помощью низкотемпературной плазмы сверхзвукового горения пропана в расширяющемся аэродинамическом канале // ТВТ. 2019. Т. 57. № 2. С. 183.
18. *Шибков В.М., Шибкова Л.В., Логунов А.А.* Параметры плазмы пульсирующего в сверхзвуковом потоке воздуха разряда постоянного тока // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 3. С. 314.
19. *Шибков В.М., Шибкова Л.В., Логунов А.А.* Влияние скорости воздушного потока на основные характеристики нестационарного пульсирующего разряда, создаваемого с помощью стационарного источника питания // Физика плазмы. 2018. Т. 44. № 8. С. 661.
20. *Шибков В.М.* Влияние тепловыделения на течение газа в канале переменного сечения // ТВТ. 2019. Т. 57. № 3. С. 353.
21. *Шибков В.М., Шибкова Л.В., Логунов А.А.* Температура электронов в плазме разряда постоянного тока, создаваемого в сверхзвуковом воздушном потоке // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3: Физика. Астрономия. 2017. № 3. С. 75.
22. *Шибков В.М., Шибкова Л.В., Логунов А.А.* Степень ионизации воздуха в плазме нестационарного пульсирующего разряда в дозвуковых и сверхзвуковых потоках // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3: Физика. Астрономия. 2018. № 5. С. 43.
23. *Шибкова Л.В., Шибков В.М., Логунов А.А., Долбня Д.С., Корнев К.Н.* Параметры плазмы пульсирующего разряда, создаваемого в высокоскоростных потоках газа. // ТВТ. 2020. Т. 58. № 6. С. 834.
24. *Шибков В.М.* Генерация быстрых электронов в плазме импульсного разряда // Физика плазмы. 2020. Т. 46. № 2. С. 186.