

Характеристики квазистационарного пульсирующего поперечно–продольного разряда в высокоскоростных пропан–воздушных потоках

Ю. К. Нестеренко,^{*} К. Н. Корнев,[†] А. А. Логунов,[‡] В. М. Шибков[§]

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физической электроники
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Статья поступила 11.01.2021; Подписана в печать 24.03.2021)

В работе рассматривается перспективность применения квазистационарного пульсирующего разряда для управления процессом сверхзвукового горения углеводородных топлив. Экспериментально получены характеристики разряда в условиях дозвукового и сверхзвукового воздушного потока. Реализовано сверхзвуковое стационарное горение пропана в расширяющемся аэродинамическом канале. Полученные результаты подтверждают эффективность использования низкотемпературной плазмы в сверхзвуковой плазменной аэродинамике.

PACS: 52.80.-s, 52.70.-m, 82.33.Vx, 82.33.Xj

УДК: 533.9.

Ключевые слова: поперечно-продольный разряд, сверхзвуковой пропан–воздушный поток, плазменно–стимулированное горение, низкотемпературная плазма.

ВВЕДЕНИЕ

Для эффективной работы высокоскоростного прямоточного воздушно-реактивного двигателя поток топливовоздушной смеси должен сохранять сверхзвуковую скорость на всех участках своего пути [1–4]. В настоящее время активно разрабатываются новые способы повышения эффективности работы прямоточного двигателя со сверхзвуковой скоростью потока в камере сгорания без применения различных застойных зон (каверн, уступов, пилонов). Одним из таких способов является применение электрического разряда. Для стабилизации горения топлива в данной работе используется пульсирующий поперечно-продольный разряд, создаваемый в высокоскоростных многокомпонентных химически активных газовых потоках [5, 6, 8–11]. Основными целями данной работы являлось экспериментальное изучение нагрева газа в низкотемпературной газоразрядной плазме, создаваемой в дозвуковых и сверхзвуковых воздушных потоках с помощью пульсирующего поперечно-продольного разряда, а также апробация изучаемого разряда с целью его использования для стабилизации горения пропана в высокоскоростных воздушных потоках.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

1.1. Описание экспериментальной установки

Основой экспериментальной установки является откачиваемая металлическая цилиндрическая барокамера

ра с внутренним диаметром 1 м и длиной 3 м. Пульсирующий поперечно–продольный разряд генерировался внутри аэродинамического канала, который помещался внутри барокамеры. Сверхзвуковой поток в аэродинамическом канале создавался при заполнении барокамеры воздухом через специально профилированное сопло Лавалья. Для предотвращения запыливания аэродинамического канала за счет тепловыделения, происходящего в условиях горения углеводородного топлива в сверхзвуковых воздушных потоках, использовался канал переменного сечения (рис. 1). При этом отношение выходного сечения $S_2 = 38 \text{ см}^2$ к входному $S_1 = 3 \text{ см}^2$ сечению канала $S_2/S_1 = 12.7$. Продольная длина канала 50 см.



Рис. 1: Общий вид расположенного внутри барокамеры аэродинамического канала длиной 50 см с $S_2/S_1 = 12.7$

Пульсирующий разряд, создаваемый с помощью источника постоянного напряжения $U = 1 - 4.5 \text{ кВ}$, формировался между двумя хорошо обтекаемыми воздушным потоком специальной формы электродами. Сечение электродов представляло собой тонкий вытянутый ромб со сглаженными вершинами. Максимальная толщина электродов не превышала 1 мм, а ширина 5 мм. Длина электродов одинакова и равна 7 см. Анод и катод монтировались внутри расширяющегося аэродинамического канала симметрично относительно его продольной оси. Электрическая схема подвода напряжения к электродному узлу изображена на рис. 2.

Эксперименты проводились в условиях высокоскоростного воздушного потока при следующих условиях: скорость потока изменялась в диапазоне 100–600 м/с,

^{*}E-mail: nesterenko.ik16@physics.msu.ru

[†]E-mail: singuliarnost@yandex.ru

[‡]E-mail: logunov_aa@physics.msu.ru

[§]E-mail: valshibmsu@gmail.com

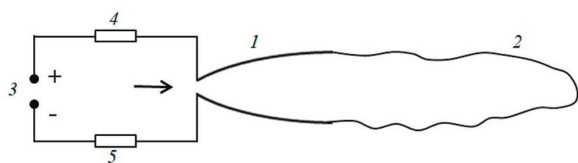


Рис. 2: Электрическая схема источника питания и блок-схема электродного узла. 1 — электроды, 2 — плазменная петля, создаваемая в высокоскоростном потоке, направление которого указано стрелкой, 3 — стационарный источник питания, 4 — балластное сопротивление, 5 — безындукционное сопротивление для измерения разрядного тока

температура газа в холодном потоке 180–250 К, длительность существования воздушного потока 3 с, концентрация пропана в потоке до 10%, длительность импульса разрядного тока 2 с, длительность инъекции пропана 2 с.

2. МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1. Изучение динамики разряда

Для изучения динамики разряда проводилась регистрация с временным разрешением общего вида разряда с помощью высокоскоростной цифровой видеокамеры «ВидеоСпринт» с электронно-оптическим наносекундным затвором при различных разрядных токах и скоростях воздушного потока 100–600 м/с, соответствующих числам Маха потока $M = 0.3 - 2$.

2.2. Определение характеристик воздушного потока

Характеристики высокоскоростного потока экспериментально определялись по измеренным значениям статического p_1 и полного p_0 давлений, соответственно, в аэродинамическом канале и ресивере. Используя хорошо известные формулы газовой динамики [2] по измеренному отношению p_1/p_0 по формуле рассчитывалась величина безразмерной скорости потока и связанные с ней величины.

2.3. Определение температуры газа в плазме разряда

Температура газа в плазменном канале пульсирующего разряда определялась спектральным методом по полосам циана и молекулярного иона азота. Для этого рассчитывались модельные распределения по вращательным и колебательным уровням с учетом аппаратной функции спектрального прибора и эффектах, приводящих к уширению спектральных линий. Температура газа считалась равной температуре, при которой получалось наилучшее совпадение рассчитанных данных с экспериментальными результатами.

2.4. Определение концентрации электронов в плазме разряда

Концентрация электронов измерялась по штарковскому уширению спектральных линий бальмеровской серии водорода. Из полученных значений полуширины $\Delta\lambda$ спектральной линии H_α выделялась штарковская компонента в соответствии с теорией контуров и эмпирической зависимостью [13].

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Динамика поперечно-продольного пульсирующего разряда в воздушном потоке

На рис. 3 представлен фрагмент хронограммы, характеризующий динамику пульсирующего разряда, создаваемого в высокоскоростном $M \approx 1$ воздушном потоке. Исследуемый разряд представляет собой тонкий плазменный канал диаметром порядка 1 мм, вытягиваемый потоком вниз по его распространению. При подаче на электроды постоянного напряжения по кратчайшему расстоянию между ними происходит пробой воздуха. Образующийся при этом плазменный канал начинает скользить по электродам в направлении высокоскоростного воздушного потока. Скорости перемещения анодного и катодного пятен вдоль электродов меньше, чем скорость центральной части канала. Анодное пятно раньше достигает кончика первого электрода и фиксируется на нем. Затем на кончике второго электрода фиксируется катодное пятно. Плазменный канал продолжает вытягиваться вдоль по потоку. Длина канала увеличивается, падение напряжения на нем растет и может превысить пороговое значение для повторного пробоя. Повторный пробой может реализовываться вблизи минимального расстояния между электродами, шунтируя весь плазменный канал, свечение которого начинает уменьшаться и канальная плазма постепенно распадается. К этому времени уже сформировался новый плазменный канал и процесс повторяется. Повторный пробой может так же реализовываться между анодной и катодной частями плазменного канала, что также приводит к шунтированию оставшейся части канала с последующим его распадом. За один цикл формирования развития плазменной петли может произойти, в зависимости от условий эксперимента, от одного до пяти и больше повторных пробоев между анодной и катодной частями плазменного канала.

3.2. Характеристики поперечно-продольного пульсирующего разряда в воздушном потоке

На рис. 4 приведен обзорный спектр излучения плазмы пульсирующего в сверхзвуковом воздушном потоке воздуха разряда при разрядном токе $i = 15.5$ А.

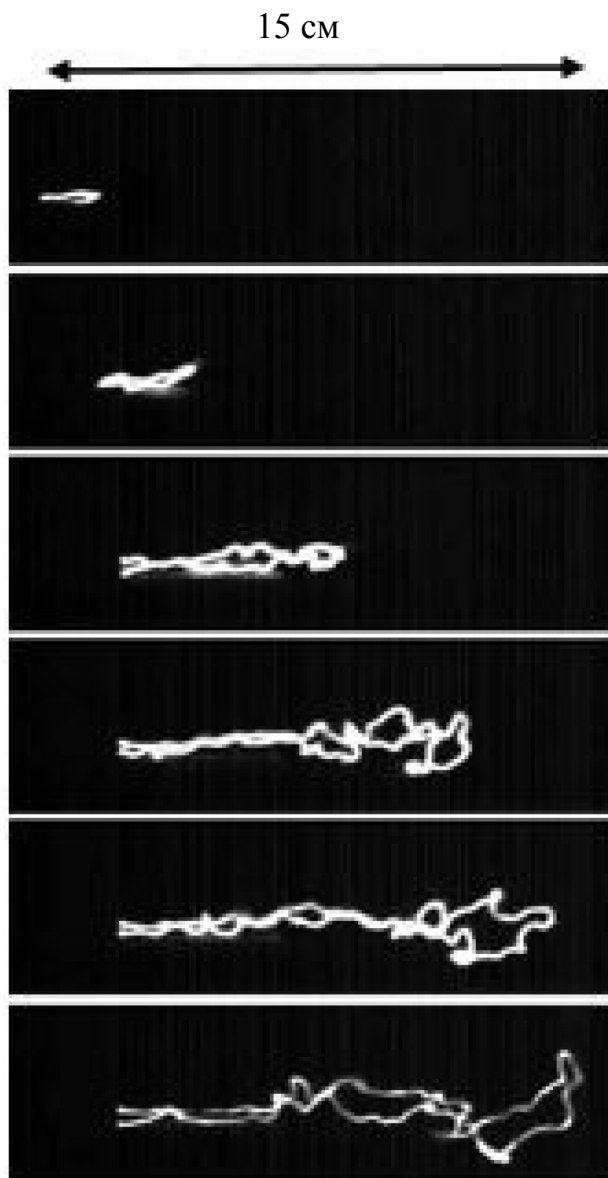


Рис. 3: Динамика пульсирующего разряда, создаваемого в высокоскоростном воздушном потоке. Время экспозиции одного кадра 4 мкс, частота повторения кадров 5000 Гц, временной интервал между кадрами 200 мкс. Поток направлен слева направо

В спектре присутствуют линии циана, кислорода, азота, молекулярного иона азота, а также линии H_α и H_β . Отличительной особенностью спектра является наличие в нем интенсивного сплошного континуума, который может быть связан либо с эффектами торможения электронов на ионах или атомах, либо с рекомбинационным спектром. В спектре не наблюдаются полосы Свана.

На рис. 5 приведена зависимость температуры газа в канальной плазме пульсирующего поперечно-продольного разряда от скорости воздушного потока.

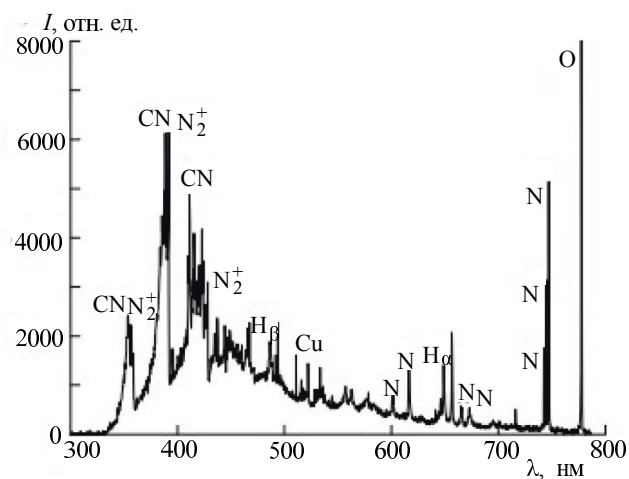


Рис. 4: Зарегистрированный на расстоянии $z = 1$ см от электродов обзорный спектр излучения пульсирующего разряда, создаваемого в сверхзвуковом потоке воздуха

Измерения проводились на расстоянии $z = 20$ мм от электродов и значении разрядного тока $i = 12.5$ А (прямая 1), и на расстоянии $z = 10$ мм и токе $i = 14.5$ А (прямая 2). Из представленных на рис. 5 данных следует, что увеличение скорости воздушного потока приводит к росту температуры газа, газ нагревается до 6000–9000 К, причем скорость нарастания температуры одинакова в обоих случаях. При всех значениях скорости потока рост разрядного тока ведет к увеличению нагрева газа. Концентрация электронов в плазме разряда достигает значений порядка 10^{16} см $^{-3}$.

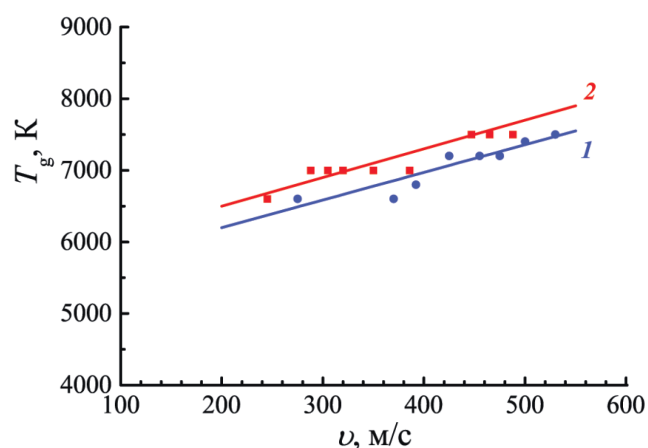


Рис. 5: Зависимость температуры газа в плазменном канале пульсирующего поперечно-продольного разряда от скорости воздушного потока на расстоянии $z = 20$ мм и разрядном токе $i = 12.5$ А (синяя прямая 1) и $z = 10$ мм и $i = 14.5$ А (красная прямая 2)

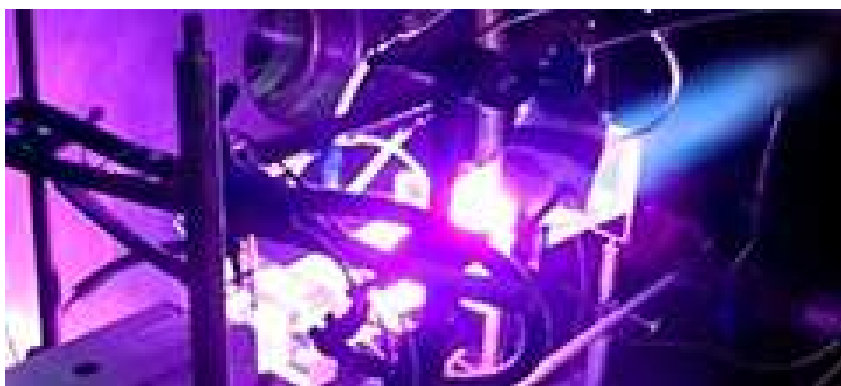


Рис. 6: Фотография плазменно-стимулированного горения пропан–воздушного топлива в расширяющемся аэродинамическом канале длиной $L = 50$ см

3.3. Применение поперечно–продольного пульсирующего разряда для воспламенения и стабилизации горения пропана в условиях воздушного потока

Высокая температура газа в канальной плазме пульсирующего разряда позволила нам осуществить быстрое воспламенение углеводородного топлива и стабилизировать горение пропана в условиях высокоскоростного воздушного потока.

В качестве примера на рис. 6 приведена фотография плазменно–стимулированного сверхзвукового горения пропан–воздушного топлива в гладком расширяющемся аэродинамическом канале. Время экспозиции кадра $t_{exp} = 16$ мс. Скорость потока на входе в канал 480 м/с, чему соответствует число Маха потока $M = 1.8$. Аэродинамический канал помещен в открытую барокамеру, давление окружающего воздуха равно 760 Торр. Длительность процесса горения 2 с, секундные массовые расходы воздуха 105 г/с и пропана 4.9 г/с, соответственно. Средняя мощность нестационарного пульсирующего разряда порядка 8 кВт.

Видно, что в процессе сгорания пропана на выходе из аэродинамического канала образуется короткий факел голубого цвета, то есть при горении не образуется сажа, поэтому в спектрах, снятых в различных областях вдоль аэродинамического канала и на выходе из него, полностью отсутствуют полосы Свана молекулярного углерода. Величина повышения давления в процессе реализации сверхзвукового горения

пропан–воздушного топлива внутри закрытой барокамеры, увеличение температуры воздуха, а также значение возникающей при горении пропана в сверхзвуковом воздушном потоке тяги указывают на то, что в условиях плазменно–стимулированного горения достигается высокая степень сгорания топлива внутри канала, моделирующего камеру сгорания сверхзвукового прямоточного воздушно–реактивного двигателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы были изучены основные характеристики низкотемпературной плазмы поперечно–продольного разряда. Показано, что в условиях разряда, создаваемого в высокоскоростных потоках воздуха, газ нагревается до 6000–9000 К. Температура газа растет с увеличением разрядного тока и скорости потока воздуха. Концентрация электронов в канальной плазме пульсирующего разряда порядка 10^{16} см^{−3}. Экспериментально реализовано стационарное сверхзвуковое плазменно–стимулированное горение пропан–воздушной смеси в расширяющихся аэродинамических каналах. Полученные в работе результаты подтверждают перспективность использования плазменной технологии для управления процессом сверхзвукового горения углеводородного топлива.

Полученные результаты были представлены на конференции «Ломоносов-2020».

-
- [1] Черный Г. Г. // Течения газа с большой сверхзвуковой скоростью. М.: Физматлит, 1959.
[2] Абрамович Г. Н. // Прикладная газовая динамика. Издание 4-е. М.: Наука, 1976.
[3] Теория и расчёт воздушно–реактивных двигателей. Учебник для вузов / Под редакцией Шляхтенко С. М. Издание 2-е. М.: Машиностроение, 1987.
[4] Бартльме Ф. // Газодинамика горения. М.: Энергоиз-

дат, 1981.

- [5] Копыл П. В., Сурконт О. С., Шибков В. М., Шибкова Л. В. // Физика плазмы. 2012. **38**, №. 6. С. 551.
[6] Шибков В. М., Шибкова Л. В., Логунов А. А. // Физика плазмы. 2017. **43**, №. 3. С. 314.
[7] Шибков В. М., Шибкова Л. В., Логунов А. А. // Физика плазмы. 2018. **44**, №. 8. С. 661.
[8] Шибков В. М., Шибкова Л. В., Копыл П. В., Логунов

- А. А. // Теплофизика высоких температур. 2019. **57**, № 2. С. 183.
- [9] Шибков В. М. // Теплофизика высоких температур. 2019. **57**, № 3. С. 353.
- [10] Шибков В. М., Шибкова Л. В., Логунов А. А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2018. № 5. С. 43.
- [11] Шибков В. М., Шибкова Л. В., Логунов А. А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2017. № 3. С. 75.
- [12] Шибкова Л. В., Шибков В. М. // Разряд в смесях инертных газов. М.: Физматлит. 2005.
- [13] Olivero J. J., Longbothum R. L. // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 1977. 17. N 2. P. 233.

Characteristics of a quasi-stationary pulsating transverse-longitudinal discharge in high-speed propane–air flows

I. K. Nesterenko^a, K. N. Kornev^b, A. A. Logunov^c, V. M. Shibkov^d

¹Department of Physical Electronics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia

E-mail: ^anesterenko.ik16@physics.msu.ru, ^bsinguliarnost@yandex.ru, ^clogunov_aa@physics.msu.ru ^dvalshibmsu@gmail.com

The paper considers the prospects of using a quasi-stationary pulsating discharge to control the process of supersonic combustion of hydrocarbon fuels. The discharge characteristics have been obtained experimentally under conditions of subsonic and supersonic air flow. Supersonic steady combustion of propane in expanding aerodynamic channels of various configurations has been implemented. The results obtained confirm the efficiency of using low-temperature plasma in supersonic plasma aerodynamics.

PACS: 52.80.-s, 52.70.-m, 82.33.Vx, 82.33.Xj.

Keywords: transverse-longitudinal discharge, supersonic propane-air flow, plasma-assisted combustion, low-temperature plasma.

Received 11 January 2021.

Сведения об авторах

1. Нестеренко Юрий Константинович — студент; тел.: (495) 939-13-37, e-mail: nesterenko.ik16@physics.msu.ru.
2. Корнев Константин Николаевич — студент; тел.: (495) 939-13-37, e-mail: singuliarnost@yandex.ru.
3. Логунов Александр Александрович — мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-13-37, e-mail: logunov_aa@physics.msu.ru.
4. Шибков Валерий Михайлович — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-13-37, e-mail: valshibmsu@gmail.com.