волной горения достаточно, чтобы стимулировать автовоспламенение газа перед волной горения. Если зафиксировать объемную долю δ (и радиус активированной области), то можно увидеть, что время автовоспламенения t₂ зависит только от t₁ (от параметров газа в момент воспламенения активированной области), эта зависимость показана на рисунке 1, черная линия - аппроксимация полиномом 2-й степени, зеленые области - предпочтительное время начала и окончания горения. Если уменьшить δ , то начальное воспламенение происходит позже из-за более низкой концентрации активных частиц в активированной области, а график t₂(t₁) сдвигается по оси t₁ (из-за увеличения радиуса активированной области автовоспламенение происходит раньше при том же t₁). Если мы изменим Q_d или α_{dis} при фиксированном δ , то t₂ останется на той же кривой.

Эти результаты показывают, как использовать неравновесный разряд в качестве эффективного инструмента для инициации и управления горением в двигателе HCCI.

Рисунок 1. Зависимость времени автовоспламенения от момента воспламенения активированной области разрядом, варьируемые параметры: δ , a_{dis} и Q_d .

AAA

7.4 Study of the effect of a magnetic field on the parameters of an arc discharge plasma and its application for the ignition of supersonic propane-air flows

Kornev K.N., Nesterenko I.K., Shibkov V.M., Logunov A.A. M.V.Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, Russia. E-mail: singuliarnost@yandex.ru.

A longitudinal-transverse discharge in high-speed gas flows is considered in this paper. The main goal of the work was the experimental study of physical and chemical processes occurring under conditions of low-temperature plasma-initiated supersonic combustion of propane-air mixtures, which is necessary for optimizing the use of a non-stationary pulsating longitudinal-transverse discharge to stabilize combustion in the combustion chamber of a scramjet engine. The main properties of the discharge magnetoactive plasma were obtained and the effect of a constant external magnetic field in the discharge region on the parameters of the lowtemperature magnetoactive plasma was studied.

The laboratory setup consists of a vacuum chamber with a volume of 3 m3, high-pressure receivers of air and propane, an air duct with a profiled Laval nozzle attached to it to create a high-speed gas flow, a rectangular smooth aerodynamic channel without stagnant zones, a high-voltage source of constant voltage 4.5 kV for discharge creating, synchronization systems and a complex of diagnostic equipment. The experiments were carried out in a cold high-speed air flow under the following conditions: the flow velocity varied in the range of 200-600 m/s, the gas temperature

in the flow was 180-250 K, the duration of the flow was up to 3 s, the concentration of propane injected in the flow was 0-10%, the discharge current could be regulated from 5 to 16 A using a ballast resistance. The mass air flow rate was from 50 to 160 g/s. The longitudinal magnetic field in the discharge region was created using Helmholtz coils of 150 mm in diameter and reached values up to 25 mT. A transverse magnetic field of 30 - 100 mT was created using two neodymium magnets with dimensions of 74 mm × 24 mm × 13 mm attached to the channel side walls either strictly opposite to each other or with a specified displacement to create a longitudinal component of the magnetic field.

Main characteristics of the discharge and its plasma were obtained in the series of experiments with external constant magnetic field of various orientations and without the field: the I – V curves of the discharge and the average discharge voltage and current, the plasma electron concentration $(2 - 6) \times 1016$ cm-3 and the plasma electron temperature of ~ 1 eV, temperature (vibrational and rotational) of heavy gas particles of 6000 - 8000 K, relative concentrations of cyanogen molecules and molecular nitrogen ions. In a series of experiments devoted to the ignition of propane-air flows the dependences of the average flame glow intensity in the visible wavelength range and an induction period of 20 - 65 ms on the propane concentration in a supersonic propane-air flow were measured in setup configurations with and without the magnetic field. A comparison of the results obtained in experiments with magnetic fields of different orientations and without it is carried out.



Figure 1. The average flame glow intensity, the speed of the propane-air flow is 420 m / s, the discharge current is 5.5A. Black curve - configuration without magnets, red - configuration with magnets.



Figure 2. Vibrational and rotational temperatures of cyanogen molecules, discharge current is 14.5A. Solid lines are rotational temperatures, dashed lines are vibrational. Red straight lines - without an external magnetic field, black - with a longitudinal magnetic field of 25 mT.

- 3. Chernyi G.G. Some recent results in aerodynamic applications of flows with localized energy addition // 9 International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference and 3 Weakly Ionized Gases Workshop, 1-5 November 1999, Norfolk, VA, USA, AIAA-99-4819.
- A. A. Logunov, K. N. Kornev, L. V. Shibkova, V. M. Shibkov. Influence of the interelectrode gap on the main characteristics of a pulsating transverse-longitudinal discharge in high-velocity multicomponent gas flows // High Temperature. 2021. Vol. 59. №. 1. P. 19–26.
- 5. Л. В. Шибкова, В. М. Шибков, А. А. Логунов и др. Параметры плазмы пульсирующего разряда, создаваемого в высокоскоростных потоках газа // Теплофизика высоких температур. 2020. Т. 58, № 6. С. 1–8.
- 6. 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. 661-674.
- Шибков В.М., Шибкова Л.В., Логунов А.А. Степень ионизации воздуха в плазме нестационарного пульсирующего разряда в дозвуковых и сверхзвуковых потоках. // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2018. № 5. С. 44–49.
- 8. И. Б. Клементьева, В. А. Битюрин, Б. Н. Толкунов, И. А. Моралев. Экспериментальное исследование электрических разрядов в газовых потоках во внешнем магнитном поле // Теплофизика высоких температур. 2011. Т.49. № 6. С. 816-825.

Изучение влияния магнитного поля на параметры плазмы дугового разряда и ее применение для воспламенения сверхзвуковых пропан-воздушных потоков

Корнев К.Н., Нестеренко Ю.К., Шибков В.М., Логунов А.А.

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия. E-mail: singuliarnost@yandex.ru.

В работе рассматривался продольно-поперечный разряд в высокоскоростных газовых потоках. Основными целями работы являлось экспериментальное изучение физико-химических процессов, протекающих в условиях инициированного низкотемпературной плазмой сверхзвукового горения пропан-воздушных смесей, что необходимо для оптимизации использования нестационарного пульсирующего продольно-поперечного разряда для стабилизации горения в камере сгорания ГПВРД. Были получены основные характеристики магнитоактивной плазмы разряда и изучено влияние постоянного внешнего магнитного поля в разрядной области на параметры низкотемпературной магнитоактивной плазмы.

Лабораторная установка состоит из вакуумной камеры объемом 3 м³, высокого И пропана, ресиверов давления воздуха воздуховода С присоединенным к нему профилированным соплом Лаваля для создания высокоскоростного потока, прямоугольного гладкого аэродинамического застойных 30Н, высоковольтного канала без источника постоянного 4,5 напряжения κВ для создания газоразрядной плазмы, системы синхронизации и комплекса диагностической аппаратуры. Эксперименты проводились в условиях холодного высокоскоростного воздушного потока при следующих условиях: скорость потока изменялась в диапазоне 200-600 м/с, температура газа в потоке 180-250 К, длительность существования потока до 3 с, диапазон концентраций инжектированного пропана в потоке 0 - 10%, разрядный ток регулировался при помощи балластного сопротивления в пределах от 5 до 16 А. Массовый расход воздуха от 50 до 160 г/с. Продольное магнитное поле в разрядной области создавалось с помощью надеваемых на аэродинамический канал катушек Гельмгольца диаметром 150 мм и достигало величин до 25 мТл. Поперечное магнитное поле величиной 30 - 100 мТл создавалось с помощью двух неодимовых магнитов размерами 74мм ×24мм ×13мм, закрепляемых на боковых стенках канала либо строго друг напротив друга, либо с задаваемым смещением для придания магнитному полю продольной компоненты.

Были получены различные характеристики разряда и разрядной плазмы в сериях экспериментов с внешним постоянным магнитным полем различной ориентации и без него: ВАХи разряда и средние значения напряжения и тока разряда, концентрация (2 - 6)×10¹⁶ см⁻³ и температура электронов ~ 1эВ в плазме разряда, температура (колебательная и вращательная) тяжелых частиц газа 6000 – 8000 К, относительные концентрации молекул циана и молекулярных ионов азота. В серии экспериментов с воспламенением пропан-воздушных потоков были измерены зависимости средней интенсивности свечения факела пламени в видимом диапазоне длин волн и периода индукции 20 – 65 мс от концентрации пропана в сверхзвуковом пропан-воздушном потоке в конфигурациях установки с магнитным полем и без него. Проведено сравнение полученных результатов в опытах с магнитным полем различной ориентации и без него.



Рисунок 3. Средняя интенсивность свечения факела пламени, скорость пропан-воздушного потока 420м/с, разрядный ток 5,5А. Черная кривая - конфигурация без магнитов, красная – конфигурация с магнитами.



Рисунок 4. Колебательная и вращательная температуры молекул циана, разрядный ток 14,5А. Сплошные прямые – вращательные температуры, пунктирные – колебательные. Красные прямые – без внешнего магнитного поля, черные – с продольным магнитным полем 25 мТл.

- 1. Chernyi G.G. Some recent results in aerodynamic applications of flows with localized energy addition // 9 International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference and 3 Weakly Ionized Gases Workshop, 1-5 November 1999, Norfolk, VA, USA, AIAA-99-4819.
- A. A. Logunov, K. N. Kornev, L. V. Shibkova, V. M. Shibkov. Influence of the interelectrode gap on the main characteristics of a pulsating transverse-longitudinal discharge in high-velocity multicomponent gas flows // High Temperature. 2021. Vol. 59. №. 1. P. 19–26.

- 3. Л. В. Шибкова, В. М. Шибков, А. А. Логунов и др. Параметры плазмы пульсирующего разряда, создаваемого в высокоскоростных потоках газа // Теплофизика высоких температур. 2020. Т. 58, № 6. С. 1–8.
- 4. 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. 661-674.
- Шибков В.М., Шибкова Л.В., Логунов А.А. Степень ионизации воздуха в плазме нестационарного пульсирующего разряда в дозвуковых и сверхзвуковых потоках. // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2018. № 5. С. 44–49.
- 6. И. Б. Клементьева, В. А. Битюрин, Б. Н. Толкунов, И. А. Моралев. Экспериментальное исследование электрических разрядов в газовых потоках во внешнем магнитном поле // Теплофизика высоких температур. 2011. Т.49. № 6. С. 816-825.