

УДК 533.6.011.5:533.9.08

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИЙ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ОБЪЕМОЦЕНТРИРОВАННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА ДЛЯ ПОДЖИГА И СТАБИЛИЗАЦИИ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВ В СВЕРХЗВУКОВЫХ ПОТОКАХ

© 2025 г. Академик РАН С. Л. Чернышев¹, **В. В. Иванов¹**,
С. И. Иншаков^{1, 2, *}, В. В. Скворцов^{1, **}, В. А. Талызин¹,
А. А. Успенский¹, В. А. Шахатов¹

Поступило 26.09.2024 г.

После доработки 26.09.2024 г.

Принято к публикации 18.10.2024 г.

Предложены концепции создания в сверхзвуковом потоке продольного электрического разряда, не привязанного к стенкам канала, и его применения для решения задач поджига и стабилизации горения в топливовоздушных потоках.

Ключевые слова: электрический разряд, сверхзвуковой поток, поджиг топлива, стабилизация горения, плазмохимические реакции, время задержки воспламенения

DOI: 10.31857/S2686740025010073, **EDN:** GTOXNP

Важным направлением исследований является разработка методов, которые обеспечивают надежное воспламенение и стабилизацию горения углеводородных топлив в сверхзвуковых потоках в условиях низких статических температур и давлений, когда обычные газодинамические методы не позволяют этого сделать.

Для решения задачи поджига и стабилизации горения топлив в сверхзвуковых потоках в нашей стране и за рубежом ведутся исследования по применению плазмотронов на основе дугового разряда высокого давления, а также других типов электрических разрядов.

Исследования, выполненные в Японии и США с применением плазмотронов на основе дугового разряда высокого давления [1–3], показывают, что плазменные струи, выдуваемые через стенку канала аэродинамической установки, не обладают скоростным напором, достаточным

для выноса продуктов плазмохимических реакций атомов и молекул и их ионов в возбужденных квантовых состояниях в центральную область потока.

Исследования по применению других типов электрических разрядов, начатые в 1997–2000 гг. в ряде институтов России [4–6], продолжаются до сих пор, достигнуты определенные успехи [7, 8]. Альтернативным направлением обеспечения надежного воспламенения и стабилизации горения в интересующих условиях предполагается использование наработок синглетного кислорода [9].

Наибольшее различие в значениях температур, характеризующих распределение энергии по степеням свободы электронов, атомов, молекул и их ионов, достигаются в так называемых наносекундных разрядах, сверхвысокочастотных и высокочастотных разрядах. Однако по технологическим причинам эти разряды трудно реализовать в каналах. Так, для создания наносекундных разрядов с требуемыми параметрами необходимы напряжения на уровне 40–50 кВ. Для ввода сверхвысокочастотного излучения в канал с целью создания разряда требуются полупрозрачные диэлектрические окна, температура разрушения которых значительно ниже, чем температура стенки канала. Для создания высокочастотных разрядов требуется излучение с длинами волн, значительно большими,

¹ Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского, Жуковский, Московская обл., Россия

² Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

* E-mail: sergey.inshakov@tsagi.ru

** E-mail: vlaskvortsov@rambler.ru

чем характерные размеры каналов, и поэтому возникают трудности в создании таких разрядов в металлических каналах из-за известного скин-эффекта.

В связи с этим представляет интерес исследование возможности применения электрических разрядов, т.е. разрядов, которые создаются между электродами, вводимыми внутрь каналов. Значительные продвижения в методике создания таких разрядов для каналов, реализуемых первоначально около стенки, а затем с некоторой задержкой воспламенения сносимых постепенно в основную область потока, имеются в ОИВТ РАН [4, 8].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ЦАГИ были проведены исследования возможности использования электрических разрядов для создания модулей пилотного пламени, в которых значительные по протяженности зоны плазмохимических реакций реализуются как непосредственно в центральной области высокоскоростного потока, так и с их смещением ближе к стенке при приемлемых затратах электрической мощности [10–12]. Помимо требования к величине потребляемой мощности, важными являются требования к обеспечению низкого аэродинамического сопротивления основному топливовоздушному потоку в канале, к возможности ввода дополнительного топлива и газофазных каталитических добавок непосредственно в зону разряда и его окрестности для интенсификации энерговыделения в ней и к сокращению времени задержки воспламенения основного потока.

Концепции модулей для создания электрического разряда с указанными свойствами разработаны в ЦАГИ совместно с МРТИ. В ходе работы исследованы две различные концепции, схематично показанные на рис. 1.

В случае рис. 1а разряд создается между профилированным анодом 1 и плоским катодом 2. Анод выполнен в виде комбинации вертикальной прямоугольной, ромбовидной в плане и наклонной (с углом наклона примерно 45°) частей. В вертикальной части имеется ряд отверстий для инъекции дополнительных компонент в сверхзвуковой поток. Боковые края анода максимально зашлифованы, а тыльные обводы скруглены.

Эксперименты с модулем, представленным на рис. 1а, показывают, что после пробоя разряд при низких значениях тока локализуется

между выступом (“зубцом”) на нижнем торце анода и плоскостью катода. Однако дальнейшее увеличение тока приводит к перемещению канала разряда скачком в новое стабильное положение, в котором он локализуется вдоль горизонтальной оси, проходящей приблизительно посередине вертикального участка анода. Стабильность горения разряда возрастает при инжекции в анод пропана через ряд отверстий I и кислорода через ряд отверстий II. Так возникает объемноцентрированный разряд, фотография которого показана на рис. 2а. Она получена при скоростях потока, соответствующих числу Маха $M = 2$; статическое давление $2.89 \cdot 10^4$ Па, статическая температура 160 К, ток разряда 1.6 А, напряжение на разряде ~ 1.7 кВ, расход пропана через ряд отверстий I 12.3 г/с, расход кислорода через ряд отверстий II 5.6 г/с, время экспозиции кадра 1/500 с.

Разряд сохранял объемноцентрированную форму при давлении $5.33 \cdot 10^4$ Па в условиях, когда нижний торец анода находился вблизи стенки, его нижняя кромка имела форму, показанную на рис. 1а, и была отшлифована, чтобы при увеличении тока разряд скачком перемещался в среднюю часть канала. Выполненные численные и экспериментальные исследования [11, 12] показали, что причиной такого поведения разряда являлось возникновение вблизи середины вертикального участка продольной, узкой в поперечном направлении, значительной по длине области с пониженным статическим давлением с увеличенным значением в ней так называемого приведенного поля E/N (E — напряженность электрического поля, N — концентрация нейтральных молекул газа). В силу особенностей распределения статического давления происходит стягивание в эту область струек топлива, подаваемого из отверстий в аноде, к середине его вертикального участка. Такова физическая причина, обуславливающая устойчивое местоположение электрического разряда и сгорание в его канале подаваемого вспомогательного топлива. Исследования [13] показали, что температура электронов в разряде может находиться на уровне $\sim 1\text{--}4$ эВ, что значительно выше газокINETической температуры, т.е. разряд является существенно неравновесным.

В случае, показанном на рис. 1б, модуль состоял из установленных по потоку трубчатого анода и катода в виде пластины с двумя выступами, выполненных из нержавеющей стали. Анод герметично вводился через стенку проточной части 1 с использованием изолятора 2 и имел

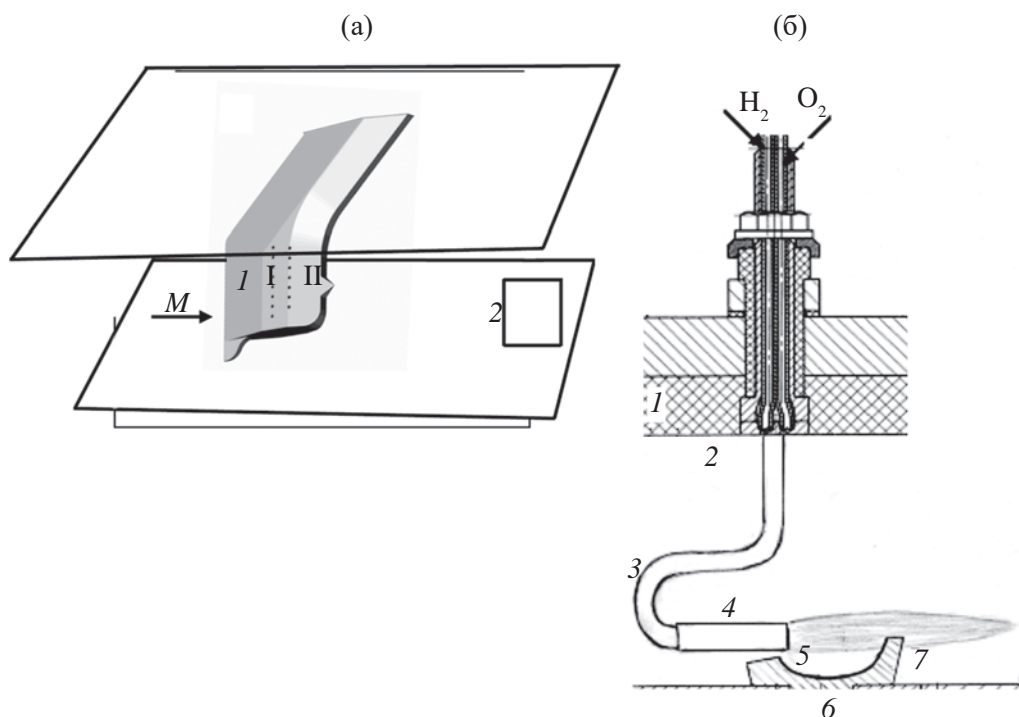


Рис. 1. Концепции разработанных электроразрядных модулей.

геометрию 3, удобную для размещения в рабочей части и подвода топлива и окислителя. Модуль заканчивался полый камерой 4, в которой при создании разряда происходило образование химически активной смеси, инжектируемой в поток. Вспомогательное топливо подводилось к этой камере по трубке, которая протянута внутри анода. Окислитель подводился по наружной трубке, образующей корпус анода. Срез внутренней трубки заглублен по отношению к срезу анода. В рассматриваемых здесь экспериментах

инжекция пропана осуществлялась через внутренний канал, а кислорода — через канал большего диаметра.

Катод 5 имел тот же потенциал, что и металлическая стенка рабочей части установки. Ближний к аноду выступ катода 6 предназначен для надежного пробоя разрядного промежутка. После зажигания разряда он сносился потоком вдоль горизонтального участка катода и при определенной величине разрядного тока замыкался в основном на дальний от анода выступ 7. Расстояние

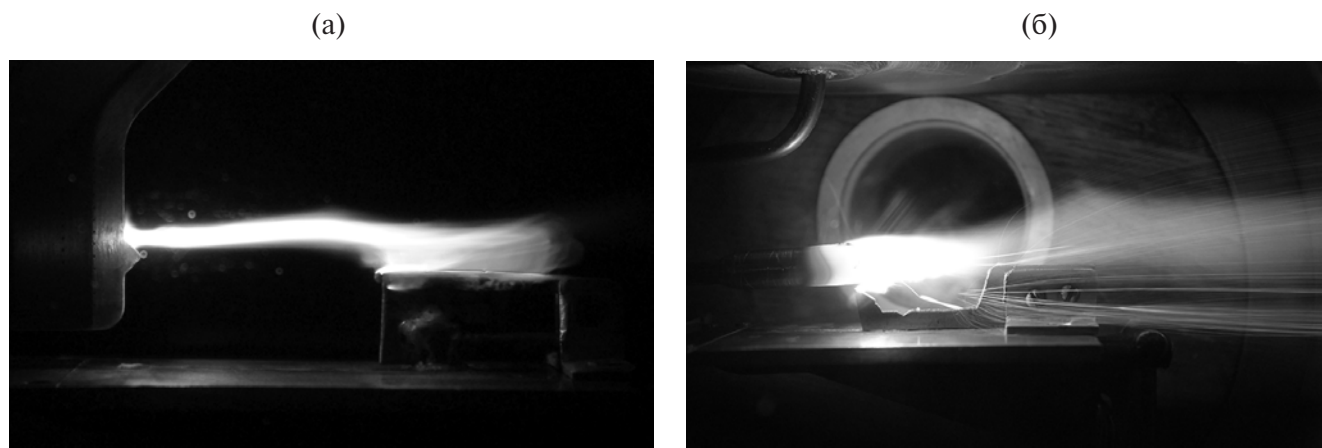


Рис. 2. Фотографии разрядов, созданных при использовании модулей, схемы которых показаны на рис. 1а и рис. 1б соответственно.

между выступами катода равно 35–37 мм. Исследования показали, что для достижения разрядом дальнего выступа катода в схеме, показанной на рис. 1б, продольная часть анода должна быть по возможности более короткой, чтобы обеспечить высокий скоростной напор набегающего воздуха на срезе анода. Центр отверстия в аноде и верхняя кромка заднего выступа катода находились на одной горизонтальной линии. На рис. 2б приведена фотография разряда, полученная при скоростях потока, соответствующих числу Маха $M = 2$; статическое давление $3.44 \cdot 10^4$ Па, статическая температура 160 К, ток разряда 1.8 А, напряжение на разряде 1.2 кВ, расход пропана 1.2 г/с, коэффициент избытка кислорода 1.6.

На промежутке выполнения серии фотографий ~ 40 с разряд имел стационарный вид. После выключения разряда сохранялась протяженная по длине высокотемпературная зона, которая, по-видимому, была аналогична факелу пропан-кислородного пламени, но существовала в окружающем холодном сверхзвуковом потоке. Горение прекращалось после выключения подачи кислорода.

С целью проверки предположения влияния величины скоростного напора набегающего воздуха на формирование области с высокой температурой в разрядном промежутке модуля проведены в отсутствие разряда измерения статического и полного давлений между нижней кромкой анода и пластиной, на которой был установлен катод модуля, при длинах горизонтального участка анода $L = 85$ мм и $L = 42$ мм. По этим данным рассчитана величина скоростного напора (рис. 3). Параметрами распределений, помимо длины горизонтального участка анода L , являлись величины статических давлений на входе в рабочую часть аэродинамической трубы. Из результатов измерений следует, что в случае анода с длинным горизонтальным участком скоростной напор около анода был примерно в два раза более низким, чем в случае короткого горизонтального участка анода. При этом существовала корреляция в геометрии и физике разряда: при длинном горизонтальном участке анода разряд замыкался только на передний выступ катода и имел низкое напряжение, характерное для дуговых разрядов.

Для повышения информативности проводимых экспериментальных исследований в ЦАГИ при участии ИНХС РАН разработана инженерная спектроскопическая методика определения температуры высокоскоростных высокотемпературных потоков, содержащих молекулы C_2 , основанная на близости в определенных условиях

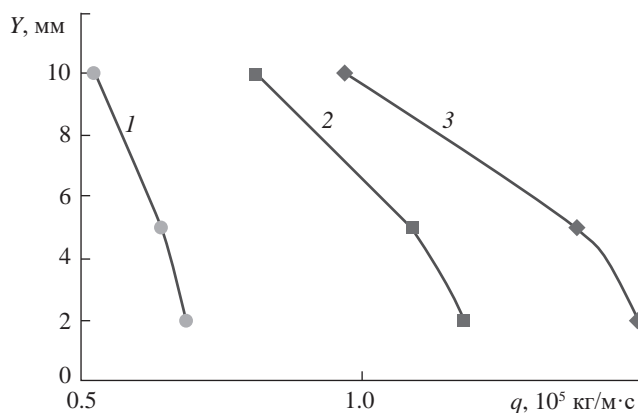


Рис. 3. Распределение скоростного напора в промежутке между нижней кромкой анода и стенкой: 1 — $L = 85$ мм, $p = 5.33 \cdot 10^4$ Па; 2 — $L = 42$ мм, $p = 3.92 \cdot 10^4$ Па; 3 — $L = 42$ мм, $p = 5.04 \cdot 10^4$ Па.

газокинетической и вращательной температур указанных молекул, с привлечением наиболее полной из известных в настоящее время баз данных о параметрах плазмохимических реакций в углерод-водородных смесях [14]. По разработанной методике проведены исследования распределения температур в зоне плазмохимических реакций модуля, представленного на рис. 1б, при инжекции, наряду с кислородом, этилена и пропана. При этом условия были такими, что вращательная и газокинетическая температуры близки друг к другу. В расчетах использовалось равновесное приближение для определения молекулярных спектров. В экспериментах применялся спектрометр, который обеспечивал работу в диапазоне ~ 200 –1100 нм. Расстояние между соседними длинами волн, в которых регистрировались значения интенсивности излучения, составляло 0.27 нм. Измерительный объем, из которого спектрометр получал информацию, имел диаметр примерно 1 мм в плоскости, перпендикулярной линии визирования, и длину 5–6 мм вдоль этой линии.

Распределения вращательной (газокинетической) температуры по высоте разрядного промежутка, полученные на ряде расстояний от среза анода, горизонтальный участок которого имел длину 42 мм, для этилена и пропана в качестве вспомогательных газов при токе разряда 1.5 А, представлены на рис. 4а и 4б соответственно. В случае эксперимента с этиленом расход газа составлял 1.5 г/с, расход кислорода — 6.2 г/с. При этом напряжение на разряде регистрировалось на уровне 0.95–1 кВ. В случае использования пропана расход газа также составлял 1.5 г/с, расход кислорода — 7.14 г/с, напряжение на разряде — 1.1–1.2 кВ. Полученные данные показывают,

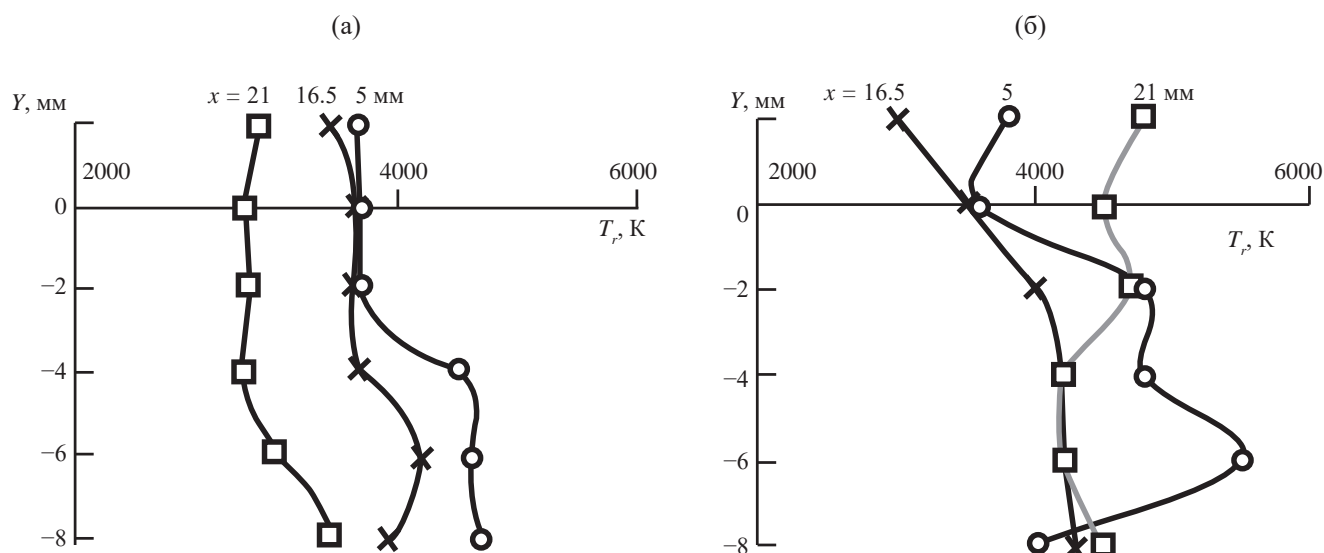


Рис. 4. Распределения вращательной температуры по высоте разрядного промежутка, полученные на ряде расстояний от среза анода для этилена (а) и пропана (б) при токе разряда 1.5 А и длине горизонтального участка анода 42 мм.

что в обоих случаях основная зона тепловыделения смещена в область ниже координаты $Y = 0$, за которую принята линия, соединяющая центр анода и верхний край дальнего выступа катода, и отражают неравномерность энергоснабжения в исследуемой зоне. При использовании пропана зарегистрированы более высокие максимальные температуры, чем при использовании этилена, т.е. имела место такая же ситуация, как в соответствующих пламенах. На одном и том же удалении от анода $X = 21.5$ мм температура в случае пропана оказалась более высокой, чем при использовании этилена. В проведенных экспериментах могли реализоваться значения температур на уровне 3500–4500 К, более высокие, чем в этилен-кислородном и пропан-кислородном пламени (~ 3000 К) или в сверхзвуковом потоке воздуха, нагреваемом одним электрическим разрядом при сопоставимых значениях подводимой электрической мощности и равных значениях статического давления (~ 2000 К).

Полученные положительные результаты по поджигу топливоздушной смеси при использовании модуля, представленного на рис. 16, позволили продолжить проведение экспериментальных исследований в канале с предварительно подогретым набегающим сверхзвуковым потоком на входе. Модуль в варианте, показанном на рис. 16, в новой серии экспериментов использовался с инъекцией через него кислорода и водорода. Канал, в котором был установлен модуль, имел прямоугольное сечение 80×100 мм. Стенки

канала имели дренажные отверстия вдоль продольной оси симметрии для измерения статического давления. Электроразрядный модуль размещался в канале в специальном отсеке так, чтобы анод и катод оказались в пограничном слое. Инжекция основного топлива в канал осуществлялась через три топливных пилона с таким расчетом, чтобы электроразрядный модуль находился в струе одного из них. Канал стыковался с плоским аэродинамическим соплом, рассчитанным на число Маха $M = 2.1$. Исследования выполнены в диапазоне полных температур потока на входе в сопло $T_0 \approx 785\text{--}850$ К.

Пример результатов, полученных при статической температуре потока на входе в канал ~ 435 К ($T_0 \approx 818$ К) и коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1.54$, представлен на рис. 5, где показаны распределения отношений давления p/p_0 по длине канала до (1) и после (2) поджига. Расход кислорода через модуль равен 12.1 г/с, полное давление равно $9.02 \cdot 10^5$ Па, напряжение на разряде составляло 0.8 кВ, ток разряда равен 1.8 А. Прекращение горения производилось в последовательности: выключение инъекции кислорода, затем водорода, прекращение подачи тока и только затем топлива.

В проведенных исследованиях показано, что методика совместной инъекции водорода и кислорода в зону разряда реализованного модуля позволяет существенно снижать энергетические затраты. Мощность, подводимая к разряду, находилась на уровне $\sim 1.4\text{--}2.5$ кВт и снижалась

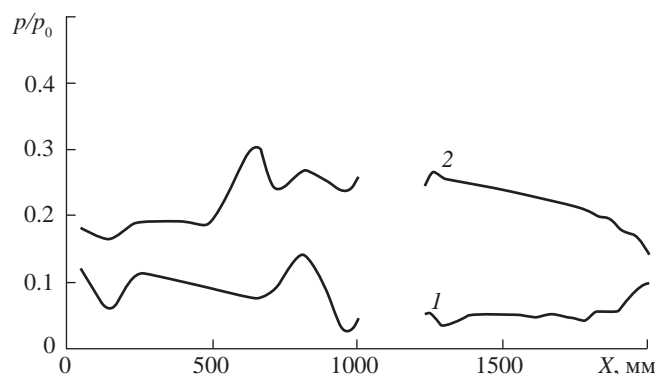


Рис. 5. Распределение статического давления по длине канала до (1) и после (2) поджига топливовоздушной смеси электрическим разрядом при инъекции водорода и кислорода в область разряда.

с увеличением расхода кислорода. В том случае, когда удавалось комбинировать разряд с газодинамическими способами управления течением в канале, мощность равнялась 0.72 кВт.

ВЫВОДЫ

Таким образом, с выбранным вариантом модуля, в котором реализована концентрированная инъекция водорода и кислорода в зону объемно-центрированного электрического разряда, получены экспериментальные данные, подтверждающие возможность воспламенения и поддержания горения топливовоздушной смеси в канале при числе Маха потока $M = 2.1$ и температуре $T_0 \approx 785\text{--}850$ К. Установлено, что разработанная концепция создания и применения объемно-центрированного электрического разряда позволяет осуществить поджиг и стабилизацию горения при низких энергетических затратах в цепи модуля при соответствующем подборе параметров.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят А. А. Николаева, О. В. Волощенко, Е. В. Дмитриева, А. В. Сысоева, С. А. Зосимова, Е. Д. Кудрявцеву, А. Ю. Урусова за помощь в организации работ и проведении экспериментов и М. А. Стародубцева за их численное сопровождение.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Программы № 20 Президиума РАН и за счет собственных средств ЦАГИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sato Y., Sayama M., Katsura O., Masuya G., Komuro T., Kudou K., Murakami A., Tani K., Wakamatsu Y., Kanda T., Chinzei N. Effectiveness of plasma torches for ignition and flameholding in scramjet // *J. Propulsion and Power*. 1992. V. 8. № 4. P. 883–889. <https://doi.org/10.2514/3.23565>
2. Jacobson L.S., Gallimore S.D., Schetz J.A., O'Brien W.F. Integration of an aeroramp injector/plasma igniter for hydrocarbon scramjets // *J. Propulsion and Power*. 2003. V. 19. № 2. P. 170–182. <https://doi.org/10.2514/2.6114>
3. Gallimore S.D., Jacobson L.S., O'Brien W.F., Schetz J.A. Operational sensitivities of a scramjet ignition/fuel – injection system // *J. Propulsion and Power*. 2003. V. 19. № 2 P. 183–189. <https://doi.org/10.2514/2.6116>
4. Chernikov V., Ershov A., Shibkov V., Timofeev B., Timofeev I., Vinogradov V., Van Wie D.M. Gas discharges in supersonic flows of air-propane mixtures // *AIAA Paper* 2001–2948. 6 p. <https://doi.org/10.2514/6.2001-2948>
5. Esakov I., Grachev L., Khodataev K., WanWie D.M. Investigation of under-critical microwave streamer discharge for jet engine fuel ignition // *AIAA Paper* 2001–2939. 9 p. <https://doi.org/10.2514/6.2001-2939>
6. Aleksandrov N., Anikin N., Bazelyan E., Zatsepin D., Starikovskaia S., Starikovskii A. Chemical reactions and ignitions in hydrocarbon-air mixtures by high-voltage nanosecond gas discharge // *AIAA Paper* 2001–2949. 10 p. <https://doi.org/10.2514/6.2001-2949>
7. Firsov A., Bityurin V., Tarasov D., Troshkin R., Bocharov A. Longitudinal DC discharge in a supersonic flow: numerical simulation and experiment // *Energies*. 2022. V. 15. № 9. P. 7015. <https://doi.org/10.3390/en15197015>
8. Firsov A.A. Experimental investigation of flameholding in scramjet combustor by pylon with plasma actuator based on Q-DC discharge // *Aerospace*. 2023. V. 10. № 3. P. 204. <https://doi.org/10.3390/aerospace10030204>
9. Старик А.М., Луховицкий Б.И. О механизме интенсификации горения при одновременном возбуждении колебательных и электронных состояний реагирующих молекул // *ДАН*. 2005. Т. 402. № 3. С. 333–338. <https://doi.org/10.1134/1.1941500>
10. Иванов В.В., Скворцов В.В., Ефимов Б.Г., Пындык А.М., Киреев А.Ю., Крашенинников В.Н., Шилленков С.В. Спектроскопические исследования продольного разряда в сверхзвуковом потоке воздуха при инъекции пропана в зону разряда // *ТВТ*. 2008. Т. 46. № 1. С. 7–14. <https://doi.org/10.1134/s10740-008-1002-5>
11. Ефимов Б.Г., Иванов В.В., Скворцов В.В., Стародубцев М.А. Стабилизация горения пропана

- в сверхзвуковом потоке воздуха с помощью неравновесного продольного разряда и соосной с ним локальной зоны пониженного давления // Изв. РАН. МЖГ. 2010. № 4. С. 143–152. <https://doi.org/10.1134/s0015462810040137>
12. Chernyshev S.L., Ivanov V.V., Skvortsov V.V. A concept of a volume-centered non-equilibrium discharge generation in ducts for the fuel combustion realization in high velocity flows // 6th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS). 29.06–03.07.2015. Krakov, PP- SAB Combustion. № 026. P. 1–8.
 13. Алаторцев В.К., Иншаков С.И., Иншаков И.С., Рожков А.Ф., Скворцов В.В., Урусов А.Ю., Успенский А.А. Исследование объемно-центрированного разряда в сверхзвуковом потоке воздуха при дополнительной инъекции пропана и кислорода // Ученые записки ЦАГИ. 2017. Т. 43. № 6. С. 41–52. <https://doi.org/10.1615/tsagiscij.2018025534>
 14. Иншаков С.И., Скворцов В.В., Шахатов В.А., Кудрявцева Е.Д., Успенский А.А. Исследование распределений вращательных температур молекул C_2 в высокотемпературных зонах, формируемых в сверхзвуковом потоке при инъекции пропана и кислорода в область разряда // ТВТ. 2022. Т. 60. № 2. С. 72–183. <https://doi.org/10.1134/S0018151X22010345>

DEVELOPMENT GENERATION AND APPLICATION OF BODY-CENTERED ELECTRIC DISCHARGE CONCEPTS FOR IGNITION AND FLAME HOLDING OF THE FUEL COMBUSTION IN SUPERSONIC FLOWS

Academician of the RAS S. L. Chernyshev^a, V. V. Ivanov^a, S. I. Inshakov^{a,b},
V. V. Skvortsov^a, V. A. Talyzin^a, A. A. Uspensky^a, V. A. Shakhmatov^a

^aCentral Aerohydrodynamic Institute named after Prof. N.E. Zhukovsky,
Zhukovsky, Moscow Region, Russia

^bMoscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

It is suggested the concepts of the longitudinal electric not binding to walls of a camera discharge creation in the supersonic flows and its application for ignition and flame holding of the fuel combustion.

Keywords: electric discharge, supersonic flow, fuel ignition, flame holding, plasma chemical reactions, ignition delay