Оптимизация плазменной системы воспламенения этилена в сверхзвуковом потоке

А. А. Фирсов[1], Е. В. Долгов[1] и С. Б. Леонов[2,1]
[1] Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва 125412, Россия
[2] University of Notre Dame, 220 Main Building Notre Dame, IN 46556, South Bend, IN 46556, США

E-mail: af@jiht.org

Статья поступила в редакцию 1 декабря 2018 г.

Аннотация. Плазменная система зажигания рассматривается как перспективный подход для воспламенения углеводородного топлива и стабилизации пламени в сверхзвуковом воздушном потоке. Зажигание и стабилизация фронта пламени газообразного топлива посредством приповерхностного разряда постоянного тока возможны в условиях сверхзвуковой камеры сгорания без механических стабилизаторов пламени. Однако, высокое энергопотребление, обычно требуемое для реализации этого метода, может ограничить его применение в реальных камерах сгорания. Представленные в данной работе экспериментальные данные получены в результате ведущихся в ОИВТ РАН исследований по плазменно-стимулированному горению и имеют целью снижение общего энергопотребления электроразрядных устройств стимуляции горения в высокоскоростных потоках. Задачей этой работы является экспериментальное исследование взаимодействия двух плазменных модулей, управляемых независимо друг от друга, и их возможностей по воспламенению и стабилизации фронта пламени газообразного топлива в сверхзвуковом потоке. Результаты данного исследования также могут быть полезными с точки зрения продления жизненного цикла электродной системы. https://doi.org/10.33849/2018102

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в мире проведены многочисленные исследования в области создания альтернативной системы зажигания на основе плазмы, которая могла бы надежно воспламенять нестехиометрические смеси при низких температурах, высоких давлениях и высокой скорости воздушного потока. Большинство методов зажигания основаны на электрических разрядах высокой плотности энергии для нагрева и ионизации смеси, приводящих к инициированию горения [1–3]. В случае плазменного воспламенения топлива и стабилизации пламени в высокоскоростном потоке рассматриваются два основных подхода: (1) воспламенение в отрывной зоне, которая затем работает как химический реактор (пилотное пламя) и (2) применение электрических разрядов высокой мощности, возбуждаемых в основном потоке. Научные группы, использующие первый подход, исследуют горение в сверхзвуковом потоке в различных геометрических конфигурациях, рассматриваемых в качестве стабилизаторов пламени [4–6], при этом плазма используется только для начального воспламенения горючей смеси в области с низкой скоростью потока. Второй подход представляется более перспективным для условий, далеких от самовоспламенения. Примером второго случая является исследование, посвященное СВЧ-разряду и его комбинациям с разрядом постоянного тока [7]. Практика показывает, что помимо непосредственного воспламенения смеси, интенсификация смешения предварительно не перемешанных компонент [8] и контроль структуры потока [9] является наиболее успешным способом стимулирования горения в высокоскоростном потоке. Высокая потребляемая мощность плазменной системы воспламенения и стабилизации пламени может ограничивать ее применение в реальных аппаратах. С целью разрешения этой проблемы в данной работе рассматривается распределенная плазменная система, состоящая из двух независимых плазменных модулей: два ряда электродов установлены заподлицо на керамических вкладках в стенку тестовой секции сверхзвукового канала ниже инжекторов подачи газообразного топлива (этилена). Основная идея использования распределенной системы зажигания состоит в том, чтобы организовать две области с маломощными разрядами, каждый из которых не способен воспламенять топливо самостоятельно ввиду низкой мощности энерговклада, но будучи активными вместе они могут обеспечить воспламенение. В целом данный подход основан на концепции двухступенчатого механизма зажигания топлива в сверхзвуковом потоке, описанном в работах [10, 11]. На первой стадии плазма обеспечивает реформинг топлива, который упрощенно может быть представлен, как производство активных радикалов и молекул: H, O, OH, H_2, CH_2O, CO, и т.д. Несмотря на интенсивную люминесценцию, в этой зоне не происходит значительного повышения температуры и давления. Конверсия топливно-воздушной смеси представляет собой источник химически активных компонент, который инициирует (при благоприятных условиях) вторую стадию окислительных реакций – обычное горение, характеризующееся высокой температурой пламени и повышением давления [12]. Следующий возможный шаг заключается в том, чтобы отключить или уменьшить мощность одного из плазменных модулей, т.к. ожидается, что стабилизация пламени требует меньшей мощности разряда, чем воспламенение.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперименты проводились в сверхзвуковой аэродинамической трубе ИАДТ-50 ОИВТ РАН при следующих параметрах потока: число Маха $M = 2$, статическое давление $P_{st} = 170$ торр, температура торможения $T_0 = 300$ K, толщина пограничного слоя в тестовой секции < 2 мм, типичный расход газа через те-

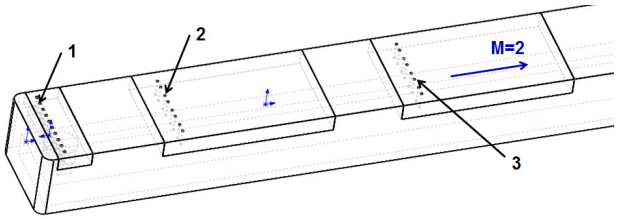

Рисунок 1. Стенка тестовой секции: 1 — $d = 1.5$ мм топливные инжекторы с расходом этилена 0.5-4 г/с, 2 — электроды первого разрядного модуля, 3 — электроды второго разрядного модуля.

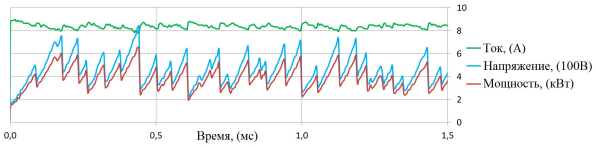

Рисунок 2. Типичные электрические характеристики $Q-$ $-DC$ — разряда в потоке для одного разрядного промежутка

стовую секцию G_{air}=0.6–0.9 кг/с, длительность стационарной стадии потока t=0.2–0.5 с. Экспериментальная установка оснащена закрытой тестовой секцией с поперечным сечением Y×Z = 72×60 мм. В данной серии экспериментов инжекция топлива (газообразного этилена) обеспечивалась со стенки канала перпендикулярно потоку в диапазоне массовых расходов G_{fuel}=0.5–4 г/с. Инжекция топлива осуществляется через 10 отверстий диаметром $d = 1.5$ мм и расстоянием между центрами 5 мм, расположенными на одной линии поперек канала (рисунок 1). Две керамические вставки с медными электродами $d = 1.5$ мм расположены ниже по потоку от топливных инжекторов для создания разряда квазипостоянного тока (Q–DC) в области смешения топлива с окислителем. Каждая вставка имеет 8 электродов, размещенных парами (анод-катод) с расстоянием между центрами электродов в одной паре 5 мм и расстоянием между смежными электродами соседних пар 7 мм. Обе электродные системы питались независимо друг от друга через два высоковольтных полупроводниковых ключа Behlke HTS 151-30-B и Мантигора HVS-10-30.

3. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ОДНОГО ПЛАЗМЕННОГО МОДУЛЯ

3.1. Описание параметров электрического разряда

Разрядная система питалась от высоковольтного источника с напряжением 5 кВ, используя балластное сопротивление для ограничения тока разряда. Типичные зависимости тока, напряжения и мощности от времени для одного разрядного промежутка представлены на рисунке 2. Длина разряда в потоке не является постоянной, она значительно изменяется с течением времени, что, в результате, приводит к значительным колебаниям сопротивления плазмы, напряжения на разряде и потребляемой мощности. Повышение напряжения соответствует увеличению длины плазменного канала, а резкое падение напряжения соответствует повторному пробою разряда. Из-за такого поведения этот тип разряда иногда называют разрядом квази-постоянного тока (Q–DC) [13].

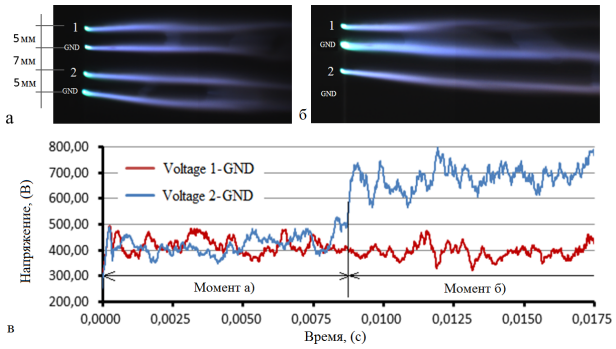

Рисунок 3. Изменение режима работы плазменного модуля: а - начальная конфигурация разряда (после активации разряда), б - устойчивая конфигурация с общим катодом, в - зависимость напряжения на разряде от времени для двух петель

Как было описано выше, каждый плазменный модуль состоит из 4 пар с зазором 5 мм между электродами в паре и зазором 7 мм между электродами соседних пар. Ожидалось, что такие расстояния между электродами в паре и между парами будут обеспечивать генерацию отдельных независимых плазменных петель, и при такой геометрии электродов должна быть реализована конфигурация плазменных каналов, представленная на рисунке 3(а). Однако такая конфигурация реализовывалась только в течение короткого времени после активации разряда. В более поздние моменты времени один из плазменных каналов мог переключаться на чужой заземленный электрод (катод). В результате реализовывался режим работы с общим катодом. Было обнаружено, что переключение не оказывает существенного влияния на 1-ю петлю, которая остается связанной с исходными электродами. Но в контуре, плазменная петля которого переключилась на соседний заземленный электрод, межэлектродное расстояние увеличивается, что приводит к увеличению длины разрядных каналов, напряжения и мощности разряда, как показано на рисунке 3(б-в). В этом режиме реализуется двойной ток через катод, а сама конфигурация является стабильной. Повторное подключение второй петли к исходному заземленному электроду не было зарегистрировано.

3.2. Воспламенение этилена с помощью одного плазменного модуля

Было обнаружено, что конфигурация с общим заземленным электродом способна воспламенять топливную смесь, в то время, как две невзаимодействующие петли в одном электродном ряду не могут воспламенить топливо. Была проведена серия экспериментов для проверки влияния на воспламенение длины разряда и увеличения локальной мощности из-за двойного тока в разрядном канале, привязанном к общему катоду. Для этого использовались две различные конфигурации геометрии электродов. Были организованы две независимые петли с 5-миллиметровым зазором между электродами (режим 1), эти петли были отделены друг от друга на расстояние 19 мм, что позволило исключить возможность пробоя на один и тот же заземленный электрод (см. рисунок 4а). Во второй конфигурации (режим 2) расстояние между соседними петлями составляло 5 мм,

а зазор между электродами составлял 7 мм (см. рисунок 4б). Чтобы предотвратить пробой разряда на один и тот же катод в этом случае расположение электродов было изменено следующим образом: пара анод/катод + пара катод/анод, т.е. зазор между двумя катодами составлял 5 мм. Также была проверена возможность воспламенения топлива в сверхзвуковом потоке одной плазменной петлей с зазором 7 мм между электродами (режим 3). Сравнение трех представленных случаев проводилось при расходе топлива $G_{fuel} = 3.8$ г/с. Стабильное зажигание топлива было получено для всех испытанных случаев. Распределение давления вдоль тестовой секции для этих режимов представлено на рисунке 5. Тестовая секция имеет плавное расширение с 70x60 до 70x70 мм в области второго окна тестовой секции на противоположной стенке напротив второго плазменного актуатора, что хорошо видно на рисунке 6. Поэтому в отсутствие горения в точке 320 мм регистрируется пониженное давление. Окончание расширения сопровождается поворотом потока у стенки и формированием скачка уплотнения, падающего на противоположную стенку ниже по течению относительно второго актуатора. Скачок может формировать небольшую отрывную зоны и содействовать воспламенению. В ходе серии экспериментов были получены два существенно разных варианта реализации горения в тестовой секции. Первый из них характеризуется небольшим увеличением давления на значительном расстоянии (300 мм) после разряда, и только после точки 320 мм был обнаружен значительный градиент давления. В этом случае разряд работает стабильно и имеет длинные прямые плазменные каналы. Второй вариант характеризуется повышением давления непосредственно после зоны разряда и увеличением градиента давления вдоль длины испытательной секции после точки 320 мм. В этом случае разряд имеет неустойчивую длину, форму и положение разрядных каналов из-за работы внутри отрывной зоны, вызванной локализацией фронта пламени вблизи электродов. Было обнаружено, что получение второго варианта горения возможно при следующих условиях: 6.5 кВт мощности в режиме 1; 5.6 кВт мощности в режиме 2; 3.5 кВт мощности в режиме 3. Типичная мощность разряда в сериях экспериментов в работе [9] составляла около 12–18 кВт для аналогичных экспериментальных условий. Таким образом, в текущей работе было достигнуто существенное уменьшение мощности, необходимой для реализации устойчивого активного горения этилена в сверхзвуковом потоке. По-видимому, полученное уменьшение мощности обусловлено увеличением длины разряда, что обеспечивает увеличение времени взаимодействия плазмы с элементарным объемом смеси. Необходимо отметить, что при фиксированном токе увеличение напряжения на разряде приводит к увеличению потребляемой мощности. Поэтому в работе сравниваются актуаторы при разном разрядном токе: актуатор с длинными плазменными нитями обеспечивает воспламенение при меньшем разрядном токе.

4. ОДНОВРЕМЕННАЯ РАБОТА ДВУХ ПЛАЗМЕННЫХ МОДУЛЕЙ

4.1. Взаимодействие двух плазменных модулей

Следующая серия экспериментов была выполнена без инжекции топлива для проверки совместной работы двух плазменных модулей для изучения влияния их работы друг на друга. Во время этих испытаний была обнаружена следующая особенность: активация первого плазменного модуля приводила к уменьшению длины разрядных каналов и уменьшению напряжения на втором плазменном модуле. Это можно четко увидеть в следующем эксперименте: сначала включается второй плазменный модуль (который находится ниже по потоку), через некоторое время включается первый (который расположен выше по течению). После активации первого модуля напряжение разряда на втором плазменном модуле уменьшилось с 1200 до 700 В, а длина разряда уменьшилась в 1.8–2 раза. В проведенном ранее численном моделировании сверхзвукового течения в прямоугольном канале в присутствии разряда первого модуля геометрические размеры и параметры течения соответствовали текущему эксперименту, а влияние на поток плазмы разряда было промоделировано объемным источником тепла [13]. Из результатов, представленных в этой работе, можно сделать вывод, что температура потока газа ниже по течению относительно первого плазменного модуля значительно увеличивает температуру в области второго модуля. Повышение температуры сопровождается уменьшением плотности и напряжения пробоя для второго плазменного модуля. Это приводит к уменьшению длины разряда и снижению потребляемой мощности. Отметим, что температура ниже по течению относительно первого плазменного модуля постепенно уменьшается по мере удаления от разряда и на расстоянии, превышающем 300 мм, этим нагревом уже можно пренебречь.

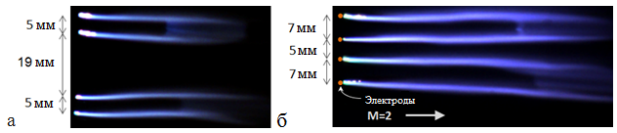

Рисунок 4. Геометрические конфигурации испытанных плазменных модулей. а — Режим 1: две плазменные петли с межэлектродным расстоянием 5 мм, б — Режим 2: две плазменные петли с межэлектродным расстоянием 7 мм.

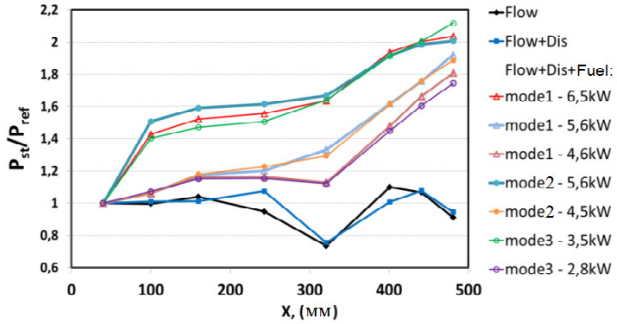

Рисунок 5. Распределение давления вдоль тестовой секции для различных режимов разряда при массовом расходе топлива 3.8 г/с.

4.2. Воспламенение и стабилизация пламени двумя плазменными модулями

В ходе следующей серии экспериментов был предпринят подход к снижению мощности, потребляемой

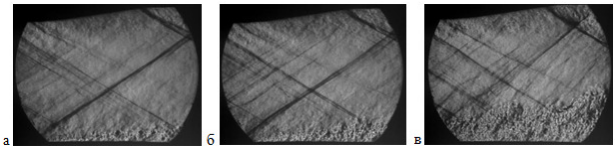

Рисунок 6. Теневая визуализация в области установки 2го модуля: а — активен 2-й плазменный модуль, б — 2-й плазменный модуль + топливо 2.5 г/с, в — оба модуля + топливо 2.5 г/с.

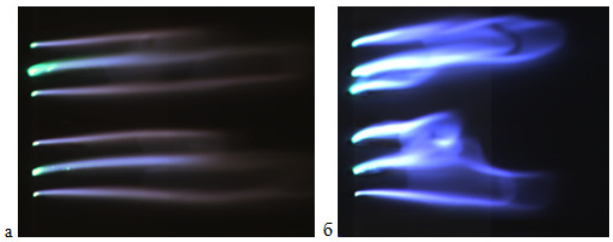

Рисунок 7. Фото разряда QDC (2-й плазменный модуль) в сверхзвуковом потоке без топлива (а) и с топливом 2.5 г/с (б).

плазменной системой воспламенения, основанный на концепции двухступенчатого механизма зажигания топлива в сверхзвуковом потоке. Были выполнены эксперименты по воспламенению этилена (~2.5 г/с) каждым плазменным модулем отдельно, а также с помощью распределенной плазменной системы, которая содержит два плазменных модуля, работающих вместе, после чего было выполнено сравнение результатов этих экспериментов между собой. Все эксперименты сопровождались теневой визуализацией структуры потока, типичные изображения, полученные с помощью теневой системы в области установки второго плазменного модуля представлены на рисунке 6. На всех изображениях в области верхней стенки показан пограничный слой, не испытывающий дополнительного воздействия. Изменение характера течения вблизи нижней стенки, показанное на рисунке 6(а) и возникший скачок уплотнения, обусловлены работой электрического разряда в отсутствие топлива. В случаях, показанных на рисунке 6(б) и 6(в) топливо подается. Для воспламенения в случае (б) используется только один (второй) разрядный модуль, а в случае (в) – оба разрядных модуля. В последнем случае клин возмущений имеет гораздо больший размер из-за расширения, вызванного горением, в то время как картина на изображении (б) практически не отличается от структуры потока, показанной на рисунке 6(а).

Горение приводит к изменению структуры течения: в случае потока без топлива мы имеем удлиненный разряд, расположенный вдоль линий тока (см. рисунок 7(а)), а в случае горения разряд следует за потоком и разрядные каналы визуализируют вихревые структуры, которые имеют место в области горения. Разряд отступает от стенки, а его длина сокращается (см. рисунок 7(б)).

Сравнение распределения статического давления для основных описанных случаев представлено на рисунке 8. Было получено, что оба плазменных модуля не могут должным образом воспламенять бедную смесь при массовом расходе топлива ~2.5 г/с. Первая плазменная система приводит лишь к незначительному увеличению давления на расстоянии 200 мм от начала испытательной секции, но ниже по потоку не происходит активного горения. Такое поведение можно объяснить начавшейся конверсией топливно-воздушной смеси, которая, тем не менее, не привела к полному или «горячему» горению. Вторая плазменная система приводит к слабому горению, и похоже, что для дальнейшего увеличения давления недостаточно длины камеры сгорания. В случае использования двух плазменных модулей одновременно давление увеличивается в зоне между двумя плазменными модулями, а в области второго генератора плазмы наблюдается быстрый рост давления. Второй плазменный генератор не позволяет топливу воспламениться, а предварительная обработка, выполняемая первым генератором, способствует ускорению процесса горения в области второго плазменного генератора. Такой эксперимент может быть косвенным подтверждением двухступенчатого механизма зажигания. Более тонкое использование этого эффекта в будущем могло бы позволить уменьшить мощность, необходимую для стабильного плазменно-стимулированного горения.

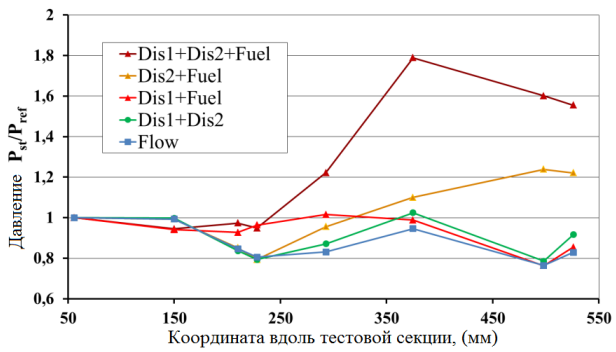

Рисунок 8. Сравнение давления для случаев независимых разрядных систем с распределенной плазменной системой, состоящей из двух исполнительных механизмов, работающих вместе.

В следующей серии экспериментов была предпринята попытка последовательного включения (и выключения) плазменных модулей. В первой части данной серии экспериментов первый плазменный модуль работал в сверхзвуковом потоке 120 мс. Второй модуль включался через 60 мс после включения первого и работал 60 мс. Эксперименты выполнялись при массовом расходе этилена 3.8 г/с. Работа плазменных модулей в случае отсутствия подачи топлива не оказывает заметного влияния на распределение статического давления вдоль тестовой секции, поэтому все зафиксированные изменения распределения статического давления вызываются только горением. В ходе этого эксперимента было обнаружено, что работа только первого генератора плазмы приводит к слабому горению со средним увеличением статического давления, которое постепенно увеличивается по мере удаления от инжектора, как показано на рисунке 9. Последующая активация второго плазменного генератора приводит к значительному повышению эффективности горения: фронт пламени смещается вверх по течению, что отчетливо видно на зависимости давления от времени по датчику, установленному на от-

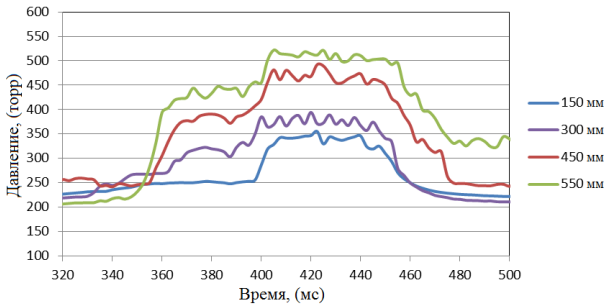

Рисунок 9. Распределение давления во время горения для эксперимента с последовательной активацией плазменных модулей.

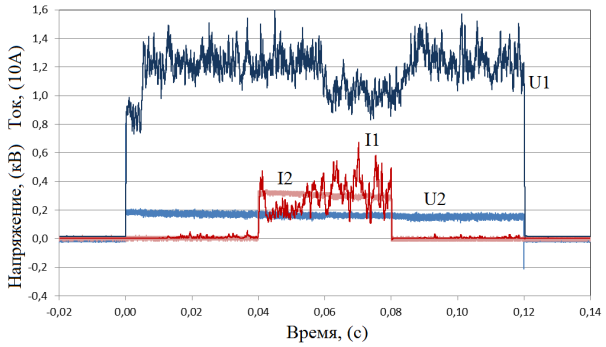

Рисунок 10. Временные зависимости электрических характеристик обоих плазменных модулей.

метке 150 мм от инжекторов топлива. При этом всеми датчиками, расположенными ниже по течению, также зафиксировано повышение давления, что подтверждает повышение полноты сгорания в пределах тестовой секции. Перемещение фронта пламени в зону первого генератора плазмы приводит к изменению характера его работы. Длина плазменных каналов уменьшается, а работа разряда становится менее стабильной, поскольку разрядные каналы следуют за линиями тока в отрывной зоне, формирующейся позади фронта пламени.

Получение активного горения в случае работы двух модулей ожидалось по результатам предыдущих экспериментов. Также предполагается, что отключение второго модуля после получения активного горения с отрывной зоной и стабилизацией фронта пламени в области первого плазменного модуля сохранит интенсивность горения на том же уровне, т.к. отрывная зона горения с плазмой разряда постоянного тока является эквивалентом плазмо-химического реактора. При этом отключение второго модуля снизит потребляемую мощность системы плазменной стабилизации горения. Чтобы проверить эту гипотезу, был проведен следующий эксперимент. Воспламенение 3.1 г/с этилена в сверхзвуковом потоке с числом Маха $M = 2$ было организовано с использованием двух плазменных модулей, а после получения режима активного горения второй модуль был отключен. Зависимости от времени электрических характеристик обоих плазменных модулей представлены на рисунке 10. После активации первого модуля ($I = 2$ А для одной плазменной петли, U=0.9–1.2 кВ, общая мощность $W = 4.2$ кВт) было обнаружено повышение среднего давления. Дальнейшая активация второго модуля через 40 мс ($I = 3$ А для одной плазменной петли, U=300–400 В, общая мощность $W = 1.8$ кВт) привела к увеличению давления и изменению характера работы первого модуля, что хорошо видно по уменьшению напряжения U_1 на рисунке 10 (0.05–0.08 с) из-за уменьшения длины разряда. Но после выключения второго модуля было зафиксировано восстановление давления до значений, полученных при активации только первого модуля. То есть после отключения второго модуля горение ухудшилось. По данным, представленным на рисунке 10, хорошо видно, что напряжение на первом плазменном модуле также восстанавливается к первоначальному состоянию – до активации второго модуля. Таким образом, в представленном случае второй модуль играет важную роль для получения стабильного эффективного горения даже после смещения фронта пламени к зоне первого плазменного модуля. Для подробного объяснения этого результата необходимы дополнительные исследования.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования распределенной плазменной системы воспламенения и стабилизации пламени этилена в сверхзвуковом потоке. Было обнаружено, что первый плазменный модуль влияет на работу второго: активация первого модуля приводит к падению напряжения на втором модуле на ~40 %, а длина разряда уменьшается в 1.8–2 раза. Испытания распределенной плазменной системы показывают, что активация второго модуля после зажигания первым модулем улучшает эффективность сгорания. Однако последующее выключение второго модуля приводит к восстановлению положения фронта пламени и распределения давления по стенке в модельной камере сгорания. Детальное исследование работы одного плазменного модуля показывает, что в данной геометрической конфигурации реализуется режим работы разряда, характеризуемый использованием соседними плазменными петлями общего катода. Смена катода приводит к увеличению длины и мощности разряда. Для проверки влияния длины разряда на воспламенение и стабилизацию фронта пламени было проведено сравнение плазменных модулей с разным разрядным промежутком (5 мм и 7 мм). Было обнаружено, что для получения интенсивного горения с помощью модуля с двумя плазменными петлями (4 электрода) и 5-миллиметровым зазором требуется 6.5 кВт электрической мощности, в то время как работа модуля той же геометрии, но с зазором 7 мм между плазменными нитями, приводит к интенсивному горению уже при 5.6 кВт. Минимальная мощность плазмы 3.5 кВт, обеспечивающая интенсивное горение, была достигнута с использованием одной плазменной петли (активно 2 электрода) с 7-миллиметровым разрядным промежутком. Указанная мощность значительно ниже, чем типичная мощность разряда в предыдущих экспериментах с плазменно-стимулированным горением.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента РФ № МК-1734.2017.8

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Starikovskaia S M 2006 *J. Phys.D: Applied Physics* **39** 265–299
2. Adamovich I V, Choi I, Jiang N, Kim J H, Keshav S, Lempert W R, Mintusov E, Nishihara M, Samimy M and Uddi M 2009 *Plasma Sources Sc. and Tech.* **18** 034018
3. Starikovskiy A and Aleksandrov N 2013 *Prog. in En. and Comb. Sc.* **39**(1) 61–110
4. Vinogradov V A, Goldfeld M A and Starov A V 2013 *Comb., Explosion and Shock Waves* **49**(4) 383–391
5. Zhang L, Yang V and Lin K C 2013 *AIAA paper* **2013-0118**
6. Li F, Yua X L, Tong Y G, Shen Y, Chen J, Chen L H and Chang X Y 2013 *Aerosp. Sc. And Tech.* **28** 72–78
7. Shibkov V M, Aleksandrov A F, Chernikov V A, Ershov A P and Shibkova L V 2009 *J. prop and pow.* **25**(1)
8. Savelkin K V, Yarantsev D A, Adamovich I V and B L S 2015 *Combust. Flame* **162**(3) 825–835
9. Firsov A A, Savelkin K V, Yarantsev D A and B L S 2015 *Phil. Trans. A* **273**(2048)
10. Leonov S B, Kochetov I V, Napartovich A P, Sabel'nikov V A and Yarantsev D A 2011 *IEEE Trans. on Plasma Sc.* **39**(2) 781–787
11. Takita K, Shishido K and Kurumada K 2011 *Proc. Combust. Inst.* **33**(2) 2383–2389
12. Kim W, Mungal M G and Cappelli M A 2010 *Combust. Flame* **157**(2) 374—-383
13. Firsov A, Dolgov E and Leonov S 2018 *J.Phys.:Conf.Ser.* (1112) 012011