

УДК 532.542.2

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ТОПЛИВНОЙ СМЕСИ С ПОМОЩЬЮ ИСКРОВОГО И ИНИЦИИРОВАННОГО СТРИМЕРНОГО РАЗРЯДА В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

© 2022 г. П. В. Булат¹, К. Н. Волков², *, Л. П. Грачев³, И. И. Есаков³, П. Б. Лавров³

¹Балтийский государственный технический университет “ВОЕНМЕХ”
им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

²Университет Кингстона, Великобритания

³Московский радиотехнический институт Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: dsci@mail.ru

Поступила в редакцию 02.04.2021 г.

После доработки 21.04.2022 г.

Принята к публикации 07.06.2022 г.

Проводится экспериментальное исследование процессов воспламенения и горения пропано-воздушной горючей смеси. Сравняется эффективность двух систем зажигания горючей газовой смеси: традиционной технологии с применением обычных искровых свечей зажигания и новой системы на основе иницированных стримерных СВЧ-разрядов. Описываются конструкционные особенности установки, спроектированной для создания и изучения мультиочаговой системы СВЧ-разрядов. Приводятся результаты исследований новой СВЧ-системы зажигания топливной смеси, которые сравниваются с данными системы воспламенения на основе искровых разрядов при их различном количестве. Результаты сравнительного анализа двух систем воспламенения даются для различных начальных давлений в камере сгорания и составов топливной смеси.

DOI: 10.31857/S0040364422040019

ВВЕДЕНИЕ

Детонационные двигатели по коэффициенту полезного действия теоретически на 20–25% превосходят традиционные реактивные двигатели, использующие термодинамический цикл Брайтона горения при постоянном давлении. Преимущество достигается за счет того, что топливо сгорает в детонационной волне в тонком слое за достаточно малый интервал времени [1].

Детонационная волна может возникнуть в результате перехода из стадии медленного горения (переход горения в детонацию, ПГД) за счет турбулизации фронта пламени. Преимущество создания детонации путем ПГД состоит в низких первоначальных затратах энергии, а недостаток — в длительном времени развития процесса и его нестабильности [2]. Для непосредственного иницирования детонации сильным взрывом в сопоставимых условиях необходимы затраты энергии примерно в 1000 раз большие, чем при ПГД. При этом существует критический уровень энергии детонации, который зависит от многих факторов [3, 4]. Увеличение объема одновременно воспламеняемой топливной смеси или многоточечное воспламенение существенно сокращают время перехода горения в детонацию [5]. Влияние со-

става топливных газовых смесей на скорость дефлаграции и детонации обсуждается в работе [2].

Основная проблема при разработке систем зажигания топливных смесей состоит в необходимости повышения надежности воспламенения без существенного повышения энергетических затрат на процесс зажигания. Использование СВЧ-излучения, мощных лазеров и коронных разрядов представляется малопривлекательным в связи с низкими КПД таких систем [6, 7]. Тем не менее объемный плазменный поджиг топливной смеси имеет неоспоримые преимущества [8–10], что позволяет использовать его не только в детонационных, но и в традиционных двигателях внутреннего сгорания для форсирования по частоте вращения или снижения выбросов окислов азота за счет существенного увеличения скорости сгорания, а также для стабилизации горения в сверхзвуковом потоке [11].

Взаимодействие электромагнитного поля с газами носит ярко выраженный пороговый характер [12]. Для иницирования горения и детонации в энергетических установках перспективным представляется способ иницирования в газе стримерного разряда в квазиоптическом СВЧ-пучке, энергия которого намного меньше энергии электрического пробоя газа [13] (подкритический стримерный разряд). В частности, в работах [14, 15] мо-

помощи специальных подставок, изготовленных из радиопрозрачного теплозащитного материала с диэлектрической проницаемостью, близкой к единице. Инициаторы СВЧ-разрядов изготавливались из проволоки диаметром 0.5 мм.

В экспериментах давление измеряется с помощью дифференциального электронного датчика давления, сигнал с которого регистрируется и запоминается с помощью осциллографа, подсоединенного к компьютеру. Показания датчика давления регистрируются и сохраняются каждые 80 или 160 мкс в зависимости от выбранного предела развертки осциллографа. Далее строятся графики зависимости давления в трубе от времени. Использование скоростной видеосъемки процесса при помощи камеры Nikon D1 со скоростью 400 кадров/с позволяет визуально наблюдать распространение фронта пламени внутри трубы через специальные смотровые окна, которые расположены на торцевой (круглое окно) и боковой (длинное узкое окно) сторонах трубы.

Для снижения возможных помех сигнала от датчиков, в том числе по цепям их питания (помеха с частотой 50 Гц), предусмотрено их автономное питание от батареек и размещение самих датчиков и источников их питания в экранирующем металлическом корпусе. Переходные фланцы датчиков присоединяются непосредственно к соответствующим фланцам трубы, в которой измеряется давление. Из экспериментально определенной калибровочной зависимости напряжения с динамического датчика от превышения давления в рабочей трубке по отношению к атмосферному давлению следует, что чувствительность динамического датчика составляет 1/200 атм/мВ.

В ходе экспериментов выявлена проблема, которая мешала нормальной съемке: в камере сгорания образовывался нагар при давлении выше 1.5 атм и при горении богатых смесей. Это связано с тем, что пропан не сгорал и частично сажа (несгоревший компонент горючей смеси) оседала на стенках камеры, в том числе на смотровом окне, через которое производилась видеосъемка, поэтому после нескольких экспериментов окно снималось и очищалось. Кроме того, на свечах зажигания образовывался налет, поэтому свечи приходилось также демонтировать и чистить.

СТРУКТУРА РАЗРЯДА

Развитие горения при искровом зажигании, начиная от момента зажигания икры до момента, когда горение охватывает весь объем камеры, показано на рис. 2. Пламя имеет характерный голубой цвет.

Развитие горения при стримерном воспламенении также за период от момента зажигания разряда до момента охвата горением всего объема камеры показано на рис. 3. Пламя розоватого цвета,

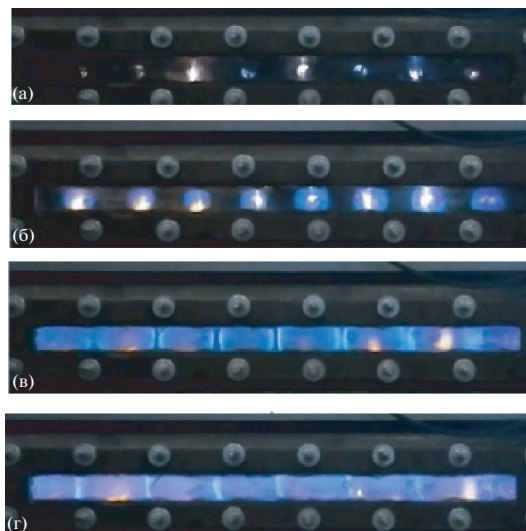


Рис. 2. Фотографии пламени при искровом зажигании смеси при $\eta = 1$ и $p_0 = 2$ атм в моменты времени, соответствующие поджигу смеси (а), 3/400 с (б), 6/400 (в) и 9/400 (г) после воспламенения.

а фронт горения в целом имеет структуру, которая наблюдается при искровом зажигании. Разряд начинает ветвиться, появляются стримерные каналы, длина которых не превышает 1.5 см. Это связано с тем, что длительность СВЧ-излучения ограничена 6 мкс, а скорость распространения стримера составляет около 2 км/с. В данном случае происходит многоточечный поджиг, а не объемный. Также разряды возникают на кварцевой трубке, на которой крепятся инициаторы. Скорость сгорания смеси в случае стримерного воспламенения практически в три раза выше, чем при искровом зажигании.

Развитие горения через торцевое стекло установки показано на рис. 4. Хорошо видно, что воспламенение происходит сразу в значительном объеме (как при объемном взрыве). Если пламя при искровом зажигании от момента образования искры (рис. 2а) до момента времени 3/400 с (рис. 2б) плавно увеличивается в размере от нуля, то при стримерном воспламенении в момент времени 1/400 с вспышка топливной смеси сразу имеет размер, показанный на рис. 3б, 4б.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При проведении исследований поджига пропано-воздушной смеси с помощью многоочаговой системы СВЧ-разрядов измеряются скорость нарастания давления, время полного сгорания смеси, максимальное давление в процессе воспламенения и предел воспламенения в зависимости от коэффициента избытка пропана в горючей смеси. Проводится сравнительный энергетический анализ двух систем поджига. Начальное давление го-

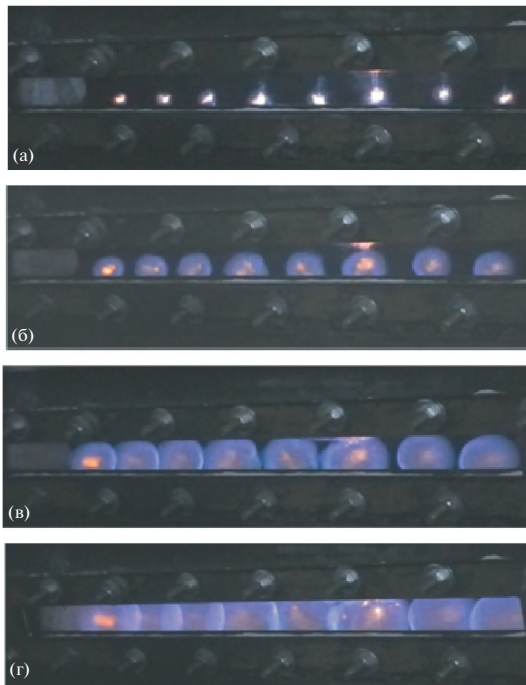


Рис. 3. Фотографии пламени при стримерном зажигании смеси при $\eta = 1$ и $p_0 = 2$ бар в моменты времени, соответствующие поджигу смеси (а), 1/400 с (б), 2/400 (в) и 3/400 (г) после воспламенения.

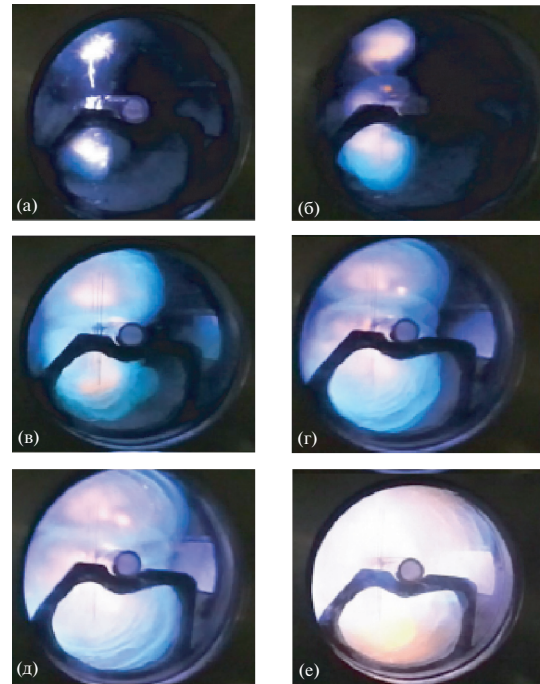


Рис. 4. Фотографии пламени через торцовое окно при стримерном зажигании смеси при $\eta = 1$ и $p_0 = 2$ атм в момент времени, соответствующий поджигу смеси (а), 1/400 с (б), 2/400 (в), 3/400 (г), 4/400 (д), 5/400 (е) после воспламенения.

рючей смеси составляло 1 атм (вариант 1) и 2 атм (вариант 2). Варьировался состав смеси (процентное соотношение пропана и воздуха). Коэффициент избытка пропана в смеси изменялся от 0.6 до 2.0. Эти значения близки к верхнему и нижнему концентрационным пределам воспламенения пропано-воздушной смеси.

Для варианта 1 зависимости давления в трубе от времени приводятся на рис. 5. Полученные результаты позволяют найти значения максимального давления при горении топливной смеси, время роста давления и скорость подъема давления. Скоростная видеосъемка позволяет определить время заполнения пламенем всего объема трубы и время сгорания смеси (окончание свечения).

Зависимости максимального давления в камере сгорания от состава топливной смеси приводятся на рис. 6. Для сравнения на этом же рисунке показан аналогичный график процесса горения, в котором используется система свечей зажигания. Значения максимального давления при СВЧ-поджиге на 10% выше, чем при использовании системы свечей зажигания. Такая же картина наблюдается и при сравнении графиков скоростей подъема давления, приведенных на рис. 7. При СВЧ-поджиге максимальная скорость составляет 160 атм/с, а при поджиге свечами зажигания – 140 атм/с.

Основные характеристики процесса горения пропано-воздушной смеси в экспериментальной

трубе приводятся в табл. 1 при начальном давлении $p_0 = 1$ атм. Здесь η – коэффициент избытка пропана в пропано-воздушной смеси, p_{\max} – давление в камере, t_p – время роста давления до p_{\max} , v_p – скорость подъема давления от p_0 до p_{\max} , t_v – время заполнения пламенем всего объема, t_b – время сгорания смеси.

Для варианта 2 зависимости давления в трубе от времени приводятся на рис. 8. Максимальное

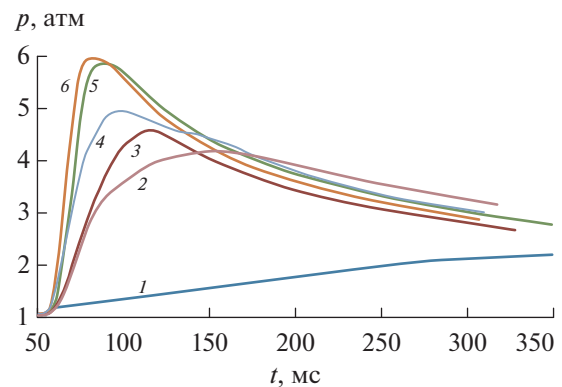


Рис. 5. Зависимости давления в трубе от времени при начальном давлении 1 атм и $\eta = 0.66$ (1), 0.83 (2), 1 (3), 1.17 (4), 1.34 (5), 1.51 (6).

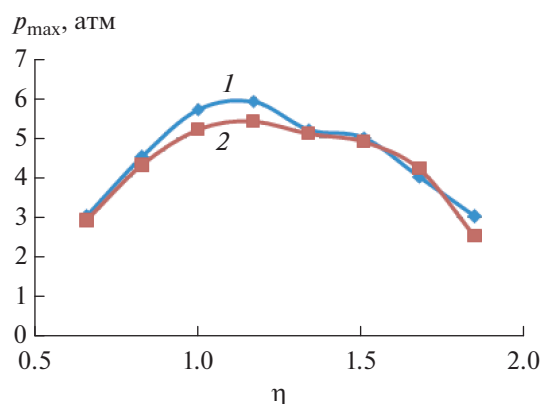


Рис. 6. Зависимости максимального давления от состава топливной смеси: 1 – при поджиге при помощи мультисистемы СВЧ-разрядов, 2 – традиционной системы искровых разрядов.

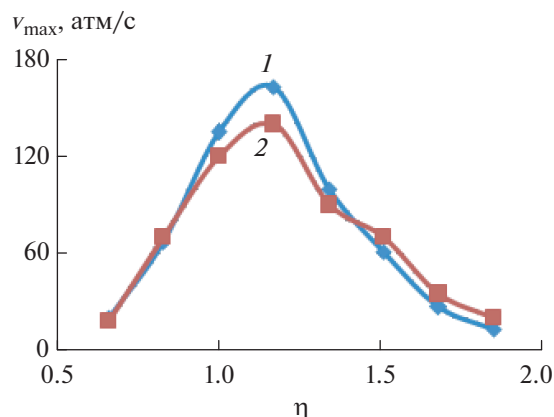


Рис. 7. Зависимости скорости нарастания давления от состава смеси: 1, 2 – см. рис. 6.

давление цикла достигает 19.2 атм при коэффициенте избытка топлива в пропано-воздушной смеси 1.51. Увеличение давления относительно начального составляло 7.7. В случае поджига топливной смеси традиционным способом (при помощи свечей зажигания) давление увеличивалось в 5.6 раз.

Зависимости максимального давления в камере сгорания от состава топливной смеси приводятся на рис. 9 для различных систем воспламенения. Как и в варианте 1 ($p_0 = 1$ атм), при увеличении начального давления до $p_0 = 2.5$ атм давление в процессе горения возрастает при использовании СВЧ-поджига на 2 атм или около 10%. Зависимости скорости подъема давления для различных составов смеси приводятся на рис. 10. Максимальная скорость при использовании СВЧ-поджига достигает 420 атм/с, а со свечами зажигания – 340 атм/с. При увеличении начального давления в камере увеличивается скорость подъема давления, причем эта зависимость в исследуемом диапазоне дав-

лений является линейной $p_{0,2.5}/p_{0,1} = v_{m,2.5}/v_{m,1} = 2.5/1 \approx 416/160$.

Основные характеристики процессов горения при начальном давлении пропано-воздушной смеси $p_0 = 2$ атм в экспериментальной трубе приводятся в табл. 2 (воспламенение с помощью одного искрового разряда), табл. 3 (четыре искровых разряда), табл. 4 (восемь искровых разрядов) и табл. 5 (стримерное воспламенение).

ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В случае искрового воспламенения скорость распространения фронта пламени составляет 4 м/с. Эта скорость слабо зависит от состава смеси. Максимальная скорость достигается при коэффициенте избытка пропана $\eta = 1.2$. Основное отличие заключается в том, что в бедной смеси яркость пламени очень слабая (энергии выделяется мало). В смеси, близкой к стехиометрическому отношению при η от 0.7 до 1.6, скорость фронта пламени практически не изменяется и составляет

Таблица 1. Зависимости параметров горения от состава смеси при поджиге мультисистемой СВЧ-разрядов при $p_0 = 1$ атм

η	p_{max} , атм	t_p , мс	v_p , атм/с	t_v , мс	t_b , мс
0.55	—	—	—	—	—
0.66	3	100	20	90	250
0.83	4.3	50	67	75	250
1	5.7	35	135	80	305
1.17	5.9	30	163	85	290
1.34	5	40	100	10	175
1.51	4.3	70	61	90	400
1.67	4.2	120	27	70	500
1.84	3	150	13	140	550
2	—	—	—	—	—

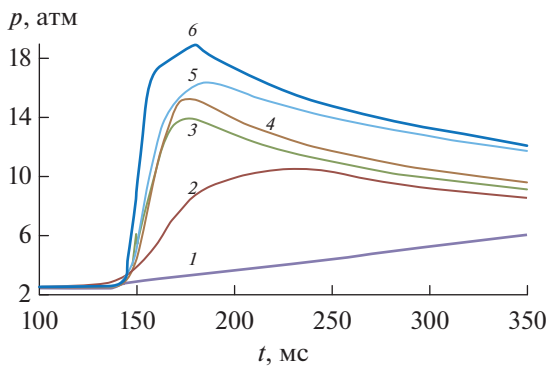


Рис. 8. Зависимости давления в трубе от времени при начальном давлении 2.5 атм и $\eta = 0.66$ (1), 0.83 (2), 1 (3), 1.17 (4), 1.34 (5), 1.51 (6).

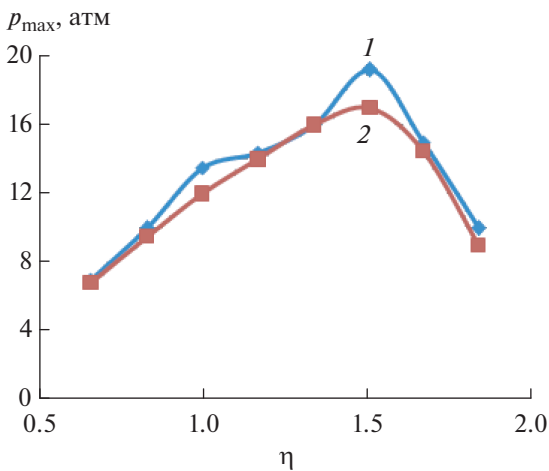


Рис. 9. Зависимости максимального давления от состава смеси: 1, 2 – см. рис. 6.

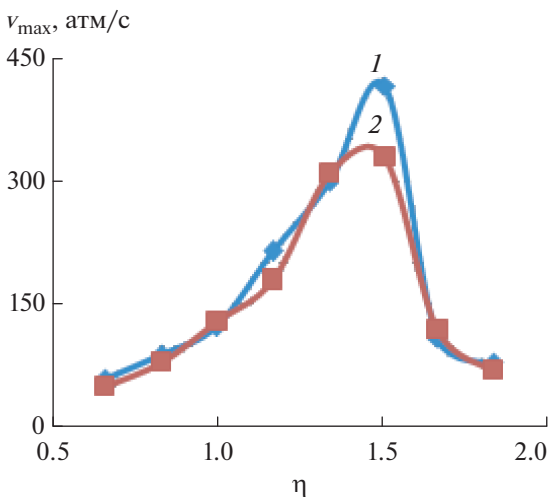


Рис. 10. Зависимости скорости нарастания давления от состава смеси: 1, 2 – см. рис. 6.

3.5–4 м/с, а в богатых смесях при $\eta = 1.7$ и выше скорость падает до 2 м/с (возрастает время всего горения). Кроме того, при горении обогащенных смесей цвет пламени оранжевый. Это говорит о том, что пропан сгорает не полностью. В случае с сильно обедненными смесями ($\eta < 0.6$) более медленного горения не наблюдается, смесь перестает гореть в принципе. Время роста давления практически не зависит от коэффициента избытка горючего и составляет около 150 мс. При изменении состава смеси меняется максимальное давление процесса горения, которое достигает максимального значения при $\eta = 1–1.5$. Следовательно, скорость роста давления является максимальной при данных значениях коэффициента избытка горючего.

В сравнении с одной свечой зажигания при использовании четырех искровых разрядов время, за которое фронт пламени занимает весь объем камеры, составляет 15/400 с (38 мс), что в 2.7 раза быстрее, чем с одной свечой в варианте 1. Время увеличивается не пропорционально числу точек поджига (в данном случае их четыре). При увеличении исходного давления в трубе растет и максимальное давление процесса сгорания, причем эта зависимость практически линейная. Например, при $p_0 = 0.5$ атм максимальное давление $p_{max} = 2.5$ атм, а при $p_0 = 2.5$ атм – $p_{max} = 13.5$ атм. Линейная зависимость сохраняется при всех начальных давлениях. При этом изменяется лишь само значение максимального давления, которое зависит от состава смеси (коэффициента избытка пропана в смеси).

При использовании восьми искровых разрядов время, за которое пламя заполняет весь объем камеры, еще сильнее уменьшается по сравнению со случаем с четырьмя свечами и составляет 9/400 = 23 мс, что в 1.5 раз быстрее. Время нарастания давления уменьшается приблизительно в 1.5 раза по сравнению с экспериментами, в которых используются четыре точки поджига, и приблизительно в три раза быстрее, чем в случае с одной точкой.

В табл. 6 представлено сравнение энергетической эффективности и особенности двух систем поджига пропано-воздушной горючей смеси. Строка 2 таблицы дает сравнение энергий, которые затрачиваются на воспламенение пропано-воздушной смеси. Энергия, которая выделяется в свечном разряде, в 4 раза превосходит значение, соответствующее СВЧ-разряду. Строка 3 показывает сравнение КПД обеих систем поджига. КПД системы СВЧ-поджига в 8 раз больше, чем КПД системы поджига свечами зажигания. Строка 4 дает сравнение количества энергии из сети Интернет.

При примерно в 30 раз меньших затратах энергии СВЧ-зажигание обеспечивает преимущество в скорости роста давления в цилиндре и скорости сгорания топливной смеси примерно на 25–30%

Таблица 2. Зависимости параметров горения от состава смеси при воспламенении смеси с помощью одного искрового разряда

η	p_{\max} , атм	t_p , мс	v_p , атм/с	t_v , мс	t_b , мс
0.66	3.7	160	23	100	230
0.83	6	120	50	85	240
1	7.15	120	60	78	305
1.17	8.5	120	71	75	290
1.34	8.5	140	60	78	450
1.51	9.7	140	70	85	400
1.67	6.9	160	43	78	500
1.84	6.5	160	40	132	550
2	Смесь не горит	—	—	—	—

Таблица 3. Зависимости параметров горения от состава смеси при воспламенении смеси с помощью четырех искровых разрядов

η	p_{\max} , атм	t_p , мс	v_p , атм/с	t_v , мс	t_b , мс
0.66	3.7	180	21	45	275
0.83	5.8	110	53	33	275
1	8.5	90	94	35	350
1.17	9.2	90	103	33	425
1.34	9.3	80	116	30	450
1.51	9.7	70	139	33	440
1.67	7.8	100	78	45	475
1.84	6.9	120	58	45	575
2	6.8	120	45	48	590

по сравнению с зажиганием восьмью автомобильными свечами. КПД СВЧ-зажигания составляет около 11%. Непосредственно к топливной смеси искрами восьми автомобильных свечей подводится в 4 раза больше энергии, чем восьмью стримерными разрядами.

По всем показателям КПД и энергозатрат система многоочагового СВЧ-поджига превосходит

традиционную систему искрового разряда. Кроме того, скорость нарастания давления больше в случае использования мультисистемы СВЧ-разрядов, хотя это увеличение не является столь существенным, составляя около 10%.

В одном из экспериментов при начальном давлении в камере $p_0 = 2.5$ атм удалось получить прямую детонацию топливной смеси при подведении

Таблица 4. Зависимости параметров горения от состава смеси при воспламенении смеси с помощью восьми искровых разрядов

η	p_{\max} , атм	t_p , мс	v_p , атм/с	t_v , мс	t_b , мс
0.66	5	160	31	30	260
0.83	7	120	70	25	250
1	9.1	80	113	20	350
1.17	11.1	75	145	20	350
1.34	11.6	50	216	20	470
1.51	10.4	45	231	24	450
1.67	8.1	80	101	27	470
1.84	7.8	120	65	40	490
2	6.9	140	50	45	500

Таблица 5. Зависимости параметров горения от состава смеси при воспламенении мультисистемой СВЧ-разрядов (восемь инициаторов)

η	p_{\max} , атм	t_p , мс	v_p , атм/с	t_v , мс	t_b , мс
0.55	—	—	—	—	—
0.66	6.5	150	160	90	250
0.83	10	85	120	75	250
1	13.5	90	123	80	305
1.17	14.4	51	215	85	290
1.34	16	53	300	10	175
1.51	19.2	35	416	90	400
1.67	14.5	90	120	70	500
1.84	10	110	75	140	550
2	Смесь не горит	—	—	—	—

Таблица 6. Энергетическая эффективность двух систем поджига пропано-воздушной горючей смеси

Параметр	Зажигание при помощи свечи	Зажигание при помощи стримерного разряда
W , Дж	6.4	1.6
КПД, %	1.5	11
P , Дж	416	14.4

к ней стримерным разрядом всего 1.6 Дж. В аналогичных условиях для прямой детонации пропано-воздушной топливной смеси необходимо от 1 до 3 г тротила, что соответствует примерно 4 кДж.

Выполненные эксперименты и расчеты при различных коэффициентах избытка горючего показывают, что оптимальными для СВЧ-зажигания с точки зрения скорости нарастания давления в камере сгорания, так же как и для искрового зажигания, являются умеренно богатые топливные смеси при $\eta = 1-1.1$. Расширения диапазона зажигания топливной смеси по коэффициенту избытка горючего при СВЧ-зажигании по сравнению с искровым зажиганием не наблюдается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено сравнение процесса воспламенения пропано-воздушной смеси с помощью многоточечного искрового и стримерного разрядов и ее горения в замкнутом цилиндре постоянного объема, имитирующем камеру сгорания. Стримерный СВЧ-разряд удаётся зажечь внутри металлической камеры сгорания, а его эффективность в качестве источника зажигания выше как точечного, так и многоточечного импульсного искрового разряда.

Скорость нарастания давления при СВЧ-зажигании на треть выше, чем при многоточечном искровом разряде и в три раза выше, чем при стан-

дартном воспламенении с помощью одной свечи, а затраты подводимой энергии почти в 30 раз меньше. Это позволяет существенно поднять удельные показатели и двигателей внутреннего сгорания, и двигателей постоянного объема. Многоточечное воспламенение стримерным разрядом дает возможность в разы увеличить скорость сжигания топлива и давление в камере сгорания по сравнению со стандартным искровым зажиганием. Детальное рассмотрение кадров съемки скоростной камерой процесса воспламенения позволяет сделать вывод, что преимущество в скорости сгорания и роста давления получены за счет объемного характера зажигания инициированным стримерным разрядом с развитой пространственной структурой. Влияние ультрафиолетового излучения не носит определяющего характера.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в ходе реализации проекта “Создание опережающего научно-технического задела в области разработки передовых технологий малых газотурбинных, ракетных и комбинированных двигателей сверхлегких ракет-носителей, малых космических аппаратов и беспилотных воздушных судов, обеспечивающих приоритетные позиции российских компаний на формируемых глобальных рынках будущего” (№ FZWF-2020-0015).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Koch J., Kutz J.N. Modeling Thermodynamic Trends of Rotating Detonation Engines // *Phys. Fluids*. 2020. V. 32. 126102.
2. Полежаев Ю.В., Стоник О.Г. От дефлаграции до детонации – три режима горения // *ТВТ*. 2010. Т. 48. № 4. С. 561.
3. Борисов А.А. Иницирование детонации в газовых и двухфазных смесях. В кн.: Импульсные детонационные двигатели / Под ред. Фролова С.М. М.: Торус Пресс, 2006. С. 159.
4. Бакланов Д.И., Голуб В.В., Иванов К.В., Кривокорытов М.С. Переход горения в детонацию в канале диаметром меньше критического диаметра существования стационарной детонации // *ТВТ*. 2012. Т. 50. № 2. С. 258.
5. Denissenko P., Bulat M.P., Esakov I.I., Grachev L.P., Volkov K.N., Volobuev I.A., Uryev V.V., Bulat P.V. Ignition of Premixed Air/Fuel Mixtures by Microwave Streamer Discharge // *Combust. Flame*. 2019. V. 202. P. 417.
6. Volkov K. Laser-induced Breakdown and Detonation in Gasparticle and Gas-droplet Mixtures // *Horizons in World Physics* / Ed. Reimer A. Nova Sci. Publ., 2015. V. 284. P. 127.
7. Saifutdinov A.I., Kustova E.V., Karpenko A.G., Lashkov V.A. Dynamics of Focused Pulsed Microwave Discharge in Air // *Plasma Phys. Rep.* 2019. V. 45. № 6. P. 602.
8. Стариковская С.М., Александров Н.Л., Косарев И.Н., Киндышева С.В., Стариковский А.Ю. Воспламенение с помощью низкотемпературной плазмы. Кинетический механизм и экспериментальная проверка // *ХВЭ*. 2009. Т. 43. № 3. С. 259.
9. Starikovskiy A., Aleksandrov N. Plasma-assisted Ignition and Combustion // *Prog. Energy Combust. Sci.* 2013. V. 39. P. 331.
10. Васильева О.Б., Кумкова И.И., Кузнецов В.Е., Рутберг А.Ф., Сафронов А.А., Ширяев В.Н. Возможности применения плазменных технологий для переработки органосодержащих веществ. Влияние формы кривой напряжения на режим работы плазмотрона // *ТВТ*. 2015. Т. 43. № 4. С. 494.
11. Чернышев С.Л., Скворцов В.В., Иванов В.В., Троциненко Г.А. Концепция создания и применения объемно-центрированного неравновесного разряда для поджига и интенсификации горения топлив в высокоскоростных потоках // *Авиационная промышленность*. 2013. № 2. С. 19.
12. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 536 с.
13. Александров К.В., Грачев Л.П., Есаков И.И., Федоров В.В., Ходатаев К.В. Области реализации различных типов СВЧ-разряда в квазиоптических электромагнитных пучках // *ЖТФ*. 2006. Т. 76. № 11. С. 52.
14. Khodataev K.V. The Initial Phase of Initiated Undercritical Microwave Discharge // *AIAA Paper*. 2005. 2005-598.
15. Esakov I., Khodataev K.V. Applicability of Ionization Overheating Instability Theory for a Microwave Gas Discharge // *AIAA Paper*. 2012. 2012-1163.
16. Тропина А.А. Минимальная энергия воспламенения при зажигании импульсным наносекундным разрядом // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2011. № 3(80). С. 73.
17. Ko Y., Anderson R.W., Arpaci V.S. Spark Ignition of Propane-air Mixture near the Minimum Ignition Energy. Part 1. An Experimental Study // *Combust. Flame*. 1991. V. 81. P. 75.
18. Phuoc T.X., White F.P. Laser-induced Spark Ignition of CH₄/Air Mixtures // *Combust. Flame*. 1999. V. 119. P. 203.
19. Ju Y., Sun W. Plasma Assisted Combustion: Dynamics and Chemistry // *Prog. Energy Combust. Sci.* 2015. V. 48. P. 21.
20. Adamovich I.V., Lempert W.R. Challenges in Understanding and Predictive Model Development of Plasma-assisted Combustion // *Plasma Phys. Controlled Fusion*. 2015. V. 57. № 1. 014001.
21. Bulat M.P., Bulat P.V., Denissenko P.V., Esakov I.I., Grachev L.P., Volkov K.N., Volobuev I.A. Numerical Simulation of Ignition of Premixed Air/Fuel Mixtures by Microwave Streamer Discharge // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2019. V. 47. № 1. P. 62.