

The Use of Subcritical Streamer Microwave Discharge for Multipoint Ignition of the Fuel Mixture Flow in Microturbine Combustion Chamber

Prodan N.V.^{1,2}, Chernyshov P.S.¹, Ilina E.E.², Lavrov P.V.³

¹ Baltic State Technical University VOENMEH, Saint-Petersburg, Russian Federation

² Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University), Saint-Petersburg, Russian Federation,

³ Moscow Radio Engineering Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Abstract. The work focuses on improving fuel economy and efficiency of combustion processes in gas turbine power plants. The use of multipoint plasma ignition of the fuel mixture in the cylindrical combustion chamber is considered. The aim of the study is to increase the efficiency of ignition of the fuel mixture. The goal is achieved both through theoretical studies carried out using numerical methods, and experimentally, in an experimental device. The propagation time of the flame front is compared at 1, 4, 8 ignition centers created by automobile candles and subcritical microwave discharges. In the calculation of combustion, a quasi-global model of chemical kinetics is used, which includes 12 components. To calculate microwave discharges, we use the system of equations of gas dynamics and Maxwell equations for a thermodynamically nonequilibrium plasma in a three-dimensional formulation. A model of absorption of microwave radiation by a streamer discharge is used, as a result of which it is heated. The most significant scientific result is that a multi-point streamer microwave discharge can be ignited inside a metal combustion chamber and its effectiveness as an arsonist is much higher than the efficiency of spark candles. The significance for practice lies in the fact that the rate of increase in pressure with multipoint microwave ignition is one third higher than with multi-point spark ignition and three times higher than with standard ignition, but the input energy is almost 30 times less. This allows you to significantly increase the specific indicators of both internal combustion engines and constant volume engines.

Keywords: microturbine, plasma-assisted ignition and combustion, low-emission combustion chamber, microwave discharge, streamer discharge, nonequilibrium plasma.

DOI: 10.5281/zenodo.3562189

Utilizarea unei descărcări de microunde streamer subcritic pentru aprinderea în mai multe puncte a fluxului amestecului de combustibil în camera de ardere a microturbinii

Prodan N.V.^{1,2}, Cernîșov P.S.¹, Ilyina E.E.², Lavrov P.V.³,

¹ Universitatea Tehnică a Statului Baltic „VOENMEH”, Sankt Petersburg, Federația Rusă,

² Universitatea Națională de Cercetări a Tehnologiilor Informaționale, Mecanică și Optică din Sankt Petersburg (Universitatea ITMO),

Sankt Petersburg, Federația Rusă

³ Institutul de Inginerie Radio din Moscova al Academiei de Științe din Rusia, Moscova, Federația Rusă

Rezumat. Lucrarea este dedicată problemei creșterii eficienței utilizării combustibilului și a eficienței proceselor de ardere în centralele cu turbine cu gaz. Se are în vedere utilizarea aprinderii cu plasmă în multe puncte a amestecului de combustibil într-o cameră cilindrică de ardere. Scopul studiului este de a crește eficiența aprinderii amestecului de combustibil. Obiectivul este atins atât prin studii teoretice realizate prin metode numerice, cât și experimental, într-o configurație experimentală. Timpul de propagare a frontului cu flacără este comparat, precum și viteza de creștere a presiunii în camera de ardere la 1, 4, 8 locuri de aprindere create de bugiile pentru automobile și descărcările subcritice cu microunde. În calculul combustiei, este utilizat un model cvasi-global de cinetică chimică, care include 12 componente. Rezultatul științific cel mai semnificativ constă în aceea, că o descărcare de difuzare cu microunde în mai multe puncte poate fi aprinsă în interiorul unei camere de ardere metalică, iar eficiența sa ca procedeu de aprindere este mult mai mare decât aprinderea cu scânteie în puncte și în mai multe puncte. Semnificația pentru practică constă în faptul că rata de creștere a presiunii cu aprindere cu microunde cu mai multe puncte este cu o treime mai mare decât cu scânteia cu mai multe puncte și de trei ori mai mare decât cea standard, iar energia de intrare este de aproape 30 de ori mai mică. Acest lucru permite majorarea semnificativă a indicatorilor specifici atât pentru motoarele cu ardere internă, cât și pentru motoarele cu volum constant.

Cuvinte-cheie: microturbină, combustie plasmatică, cameră de ardere cu emisii scăzute, descărcare de microunde, descărcare în flux, plasmă fără echilibru.

Применение подкритического стримерного СВЧ разряда для многоточечного поджигания потока топливной смеси в камере сгорания микротурбины

Продан Н.В.^{1,2}, Чернышов П.С.¹, Ильина Е.Е.², Лавров П.В.³

¹Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ», Санкт-Петербург, Российская Федерация,

²Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), Санкт-Петербург, Российская Федерация

³Московский радиотехнический институт российской академии наук, Москва, Российская Федерация

Аннотация. Работа посвящена проблеме повышения топливной экономичности и эффективности процессов горения в газотурбинных энергетических установках. Рассматривается использование многоточечного плазменного зажигания топливной смеси в цилиндрической камере сгорания. Целью исследования является повышение эффективности зажигания топливной смеси. Поставленная цель достигается как при помощи теоретических исследований, выполненных с применением численных методов, так и экспериментально, на экспериментальной установке. Сравняется время распространения фронта пламени, а также скорости роста давления в камере сгорания при 1, 4, 8 очагах воспламенения, создаваемых автомобильными свечами и подкритическими СВЧ разрядами. СВЧ разряды инициируются при помощи полуволнового резонатора. Используется генератор с длиной волны электромагнитного излучения $\lambda=0,123$ м. Начальное давление топливной смеси изменяется от $0,5 \cdot 10^5$ до $2,5 \cdot 10^5$ Па. Коэффициент избытка горючего η изменяется от 0,5 до 2,1. При расчете горения используется квазиглобальная модель химической кинетики, включающая 12 компонентов. Для расчета СВЧ разрядов используется система уравнений газовой динамики и уравнений Максвелла для термодинамически неравновесной плазмы в трехмерной постановке. Используется модель поглощения СВЧ излучения стримерным разрядом, в результате чего происходит его разогрев. Наиболее существенным научным результатом является тот факт, что многоточечный стримерный СВЧ разряд удается зажечь внутри металлической камеры сгорания и его эффективность в качестве зажигания гораздо выше как точечного, так и многоточечного искрового зажигания. Значимость для практики состоит в том, что скорость нарастания давления при многоточечном СВЧ зажигании на треть выше, чем при многоточечном искровом и в три раза выше, чем при стандартном, а затраты подводимой энергии почти в 30 раз меньше. Это позволяет существенно поднять удельные показатели как двигателей внутреннего сгорания, так и двигателей постоянного объема.

Ключевые слова: микротурбина, плазменное горение, малоэмиссионная камера сгорания, СВЧ-разряд, стримерный разряд, неравновесная плазма.

ВВЕДЕНИЕ

Целью исследования является изучение возможности повышения эффективности сжигания топлива в двигателях внутреннего сгорания, газотурбинных двигателях, работающих по циклу Брайтона, а также перспективных двигателях, использующих термодинамический цикл Хамфри горения при постоянном объеме.

В исследовании сравнивается процесс воспламенения и горения в замкнутом цилиндре постоянного объема при искровом зажигании и многоточечном зажигании стримерным разрядом [1].

Результаты исследования показали, что цель - повышение эффективности - вполне достижима, т.к. многоточечное зажигание стримерным разрядом позволило в разы увеличить скорость сжигания топлива и давление в камере сгорания по сравнению со стандартным искровым зажиганием.

Выигрыш достигается за счет объемного многоточечного характера воспламенения.

Пределы совершенствования традиционных двигателей практически достигнуты. Одним из дальнейших путей повышения эффективности является переход к сжиганию топлива при постоянном объеме. Разновидностью такого двигателя является детонационный двигатель [2], в котором воспламенение топлива происходит во фронте детонационной волны [3], представляющей собой газодинамический разрыв - ударную волну и следующую за ней область горения.

Наиболее «продвинутой» в практическом плане концепцией является ротационный детонационный двигатель (RDE) [4, 5], в котором ударно-волновая структура, содержащая детонационную волну, вращается в кольцевом зазоре камеры сгорания с постоянной скоростью, равной скорости Чепмена - Жуге.

Ротационные двигатели относятся к классу двигателей с непрерывной детонацией. В настоящее время разработаны и испытаны полномасштабные воздушно-реактивные двигатели с непрерывной детонацией [6], газотурбинные с ротационно-детонационной камерой сгорания [7], ракетные [8]. Малое время, большой градиент давления, при котором происходит сгорание в детонационной волне, снижают выбросы окислов азота [9] и позволяют сжигать экстремально бедные топливные смеси [10, 11, 12]. Существуют проблемы с получением гарантированного направления вращения детонационной волны при иницировании детонации [13]. Попытки её решить привели к оригинальной концепции с двумя детонационными волнами противоположного вращения [14].

Экспериментальные и численные исследования показывают, что при потенциально высокой термодинамической эффективности RDE [15], на практике RDE пока уступают традиционным газотурбинным и ракетным двигателям. Причина, видимо, заключается в том, что в кольцевом зазоре иницируемая детонационная волна претерпевает трансформации с образованием нескольких разрывов, которые в процессе интерференции [16] между собой, образуют несколько тройных конфигураций ударных волн [17]. Каждая из таких конфигураций состоит из двух косых скачков и одного прямого. Детонация происходит только на прямом скачке. Чем больше размер прямых ударных волн, тем ближе реальная картина детонации к идеальной модели. При скорости детонационной волны Чемпена-Жуге, характерной для установившейся детонации, прямые скачки, наоборот, имеют минимальный размер.

Чтобы увеличивать область детонации, необходимо использовать пересжатую детонацию, но она не является самоподдерживающейся. Данное техническое противоречие является трудно разрешимым, поэтому в последнее время предпринимаются попытки объединить газовую турбину с импульсно-детонационным двигателем (PDE) [18]. Традиционно, PDE выполняются с механическими или газодинамическими клапанами [19] и, в этом отношении, они подобны двигателям внутреннего сгорания.

Подобные конструкции свободны от описанной выше проблемы RDE, теоретических ограничений на увеличение КПД нет [20]. Но имеются технические проблемы с подачей

топливной смеси и удалением продуктов сгорания. Причина состоит в том, что в классическом PDE значительное время уходит на процесс перехода обычного горения в детонацию. Соответственно, PDE имеют детонационные трубы значительной длины, порядка 20 калибров.

Попытки собрать множество детонационных труб в пакет и совместить их с конструкцией турбины привели к достаточно перспективной концепции волнового диска [21]. В таких дисках используются профилированные каналы, в которых волны сжатия распространяются в радиальном направлении. За счет применения специальных профилей можно добиться того, чтобы волны сжатия были центрированными [22], что в разы сокращает путь сжатия. Время образования детонационной волны зависит от характера зажигания, это характерно как для RDE [23], так и для PDE [24], [25]. В целом, как показали исследования [26], увеличение объема одновременно воспламеняемой топливной смеси или многоточечное воспламенение существенно сокращают время перехода к детонации.

В настоящей работе изучается воспламенение в цилиндре постоянного объема предварительно перемешанной топливной смеси пропана с воздухом при помощи многоточечного искрового зажигания и многоточечного зажигания примерными СВЧ разрядами.

Последний тип зажигания не следует путать с различными типами плазменного горения, такими как горение в среде коронного разряда или наносекундного разряда [27]. Метод ближе к лазерному способу создания плазменного очага горения [28].

Преимуществом исследуемого типа зажигания по сравнению с современными работами является увеличение скорости сгорания топлива при постоянном объеме от 20-30% до нескольких раз, при уменьшении затрат энергии на зажигание примерно в 30 раз.

1. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведены эксперименты по изучению воспламенения и горения при постоянном объеме пропан-воздушной смеси в экспериментальной камере сгорания. Экспериментальная установка изображена на рис. 1.

Установка имеет два смотровых окна (фронтальное и боковое), через которые можно было производить видеосъемку процесса воспламенения на скоростную камеру Nikon D1, 400 кадров в секунду. Благодаря

этим видеозаписям, можно оценить скорость распространения фронта пламени и время горения пламени.

В экспериментах измерялось давление с помощью двух дифференциальных электронных датчиков давления.



Рис.1. Экспериментальная установка. ¹

Установка позволяла поджигать топливную смесь 1, 4, 8 искровыми автомобильными свечами или 8 стримерными СВЧ разрядами. СВЧ разряды зажигались на инициаторах (*Ni-Cr* проволока диаметром 0,5 мм), оптимальная (резонансная) длина которых рассчитывалась и определялась экспериментально (рис.2).

СВЧ излучение с длиной волны $\lambda=0,123$ м подавалось в камеру сгорания через рупор от магнетрона СВЧ генератора ВИТС.468766.001 РЭ, разработанного и изготовленного в АО «МРТИ РАН».

Технические характеристики генератора:

- марка СВЧ магнетрона - МИ-456А;
- частота следования импульсов - 1-800 Гц или однократные импульсы;
- Длительность импульсов: $2 \cdot 10^{-6}$ - $6 \cdot 10^{-6}$ с;
- Мощность импульса: $50 \cdot 10^3$ – $600 \cdot 10^3$ Вт.

В рабочую камеру сгорания было установлено 8 инициаторов с шагом 0,04 м.

Кварцевая трубка устанавливалась в центре камеры по оси трубы на специальных подставках, изготовленных из радиопрозрачного теплозащитного материала с диэлектрической проницаемостью близкой к единице.

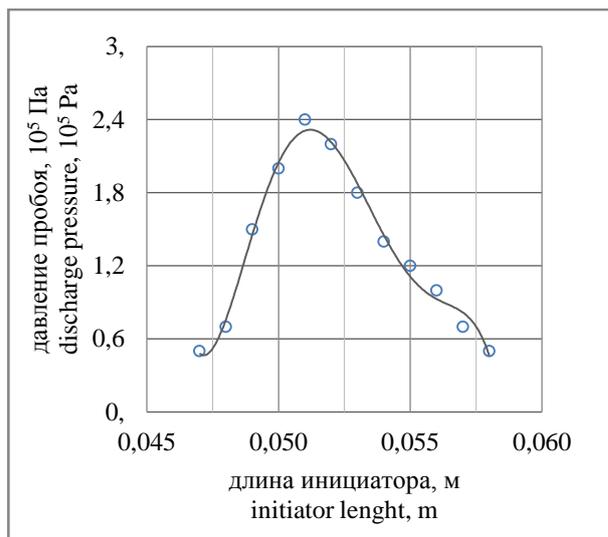


Рис.2. Определение резонансной длины инициатора СВЧ разряда - зависимость давления СВЧ пробоя газа от длины инициатора. ²

Для зажигания искровых свечей использовалась электронная схема с высоковольтным накопительным конденсатором C_2 , коммутируемым через ограничительные резисторы $R_2=R_i + R_{пр}$ на необходимое количество свечей зажигания. Главное преимущество примененной в работе схемы поджига свечей – это возможность выделения большой энергии за малый промежуток времени, что необходимо для обеспечения устойчивого искрообразования и сравнительной простоты получения искры практически любой мощности и энергии. Добиться этого с обычной транзисторной или тиристорной схемой оказалось весьма затруднительно. Длительность разряда составляла $8,5 \cdot 10^{-3}$ с, из которых первые $4 \cdot 10^{-3}$ с вызвали воспламенение, а в течение следующих $4,5 \cdot 10^{-3}$ с происходило падение силы тока и напряжения. Количество энергии, которое выделала свеча, равнялось 0,5 Дж, 4 свечи - 2 Дж, 8 - 4 Дж.

В ходе экспериментов варьировались следующие параметры:

- 1) изменялось количество поджигающих разрядов - 1, 4, 8 шт.;
- 2) изменялось начальное давление смеси - $0,5 \cdot 10^5$ Па; $1,5 \cdot 10^5$ Па; $2 \cdot 10^5$ Па; $2,5 \cdot 10^5$ Па;
- 3) изменялся состав смеси (соотношение пропана к воздуху).

Были проведены эксперименты при коэффициентах избытка η пропана в смеси относительно стехиометрического соотношения в интервале от 0,6 до 2,0.

При других значениях η смесь не воспламенялась. Эти значения η близки к верхнему

и нижнему концентрационному пределу воспламенения пропан-воздушной смеси.

При проведении экспериментов ставились следующие цели:

1) сравнение скорости нарастания давления и сравнение максимальных давлений в камере сгорания при различном количестве искровых свечей;

2) сравнение скорости нарастания давления и сравнение максимальных давлений в камере сгорания при зажигании 8 искровыми свечами и 8 стримерными разрядами;

3) выяснение - позволяет ли стримерный разряд в камере сгорания зажигать топливную смесь за пределами воспламенения в нормальных условиях;

4) определение оптимального η при многоточечном искровом и стримерном зажигании, обеспечивающем наибольшее максимальное давление и наибольшую скорость нарастания давления в камере сгорания.

Для проверки и выявления влияния разных физических факторов на результаты был выполнен вычислительный эксперимент. В расчетах исследовалось развитие пламени при зажигании смеси 1,4,8 искровыми свечами и 1 и 8 СВЧ разрядами.

В процессе расчетов при стримерном зажигании использовалась модель стримерного разряда, начальные и граничные условия, численный метод и его связь с физикой пространственно развитого стримерного разряда, ранее рассмотренные в работе [29]. Продолжительность СВЧ разряда полагалась равной $6 \cdot 10^{-6}$ с, а подведенная к плазме энергия - 1,6 Дж. При расчете искрового зажигания использовалась стандартная модель искры с продолжительностью разряда $4 \cdot 10^{-3}$ с и количеством выделяемой одной свечой энергии - 0,5 Дж. Мощность выделения энергии менялась по линейному закону - от максимальной в начальный момент времени до 0,5 максимальной в момент времени $4 \cdot 10^{-3}$ с. При расчете горения используется квазиглобальная модель химической кинетики, включающая 12 компонентов.

II. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 - 5 приведены кинограммы развития фронтов горения при искровом и стримерном зажигании. На рис.3 показано развитие горения при искровом зажигании, начиная от момента зажигания икры, до момента, когда горение охватывает весь объем камеры.

Пламя имеет голубой цвет, что характеризуется одностадийным ламинарным горением газового топлива.

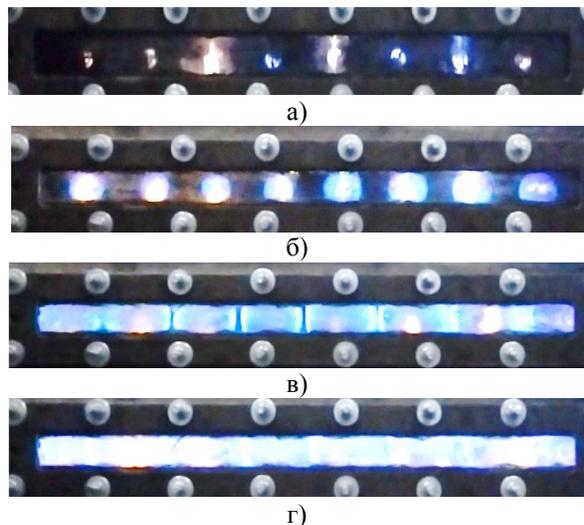


Рис. 3. Фото пламени при искровом зажигании смеси с $\eta = 1$, при $p_0 = 2 \cdot 10^5$ Па: а – поджиг, б – 3/400 с, в – 6/400 с, г – 9/400 с.³

На рис.4 показан момент зажигания стримерного разряда. Видно, что его размеры существенно превышают размеры искры и имеют пространственно развитую структуру.



Рис.4 Фото стримерных СВЧ разрядов в камере, заполненной воздухом.⁴

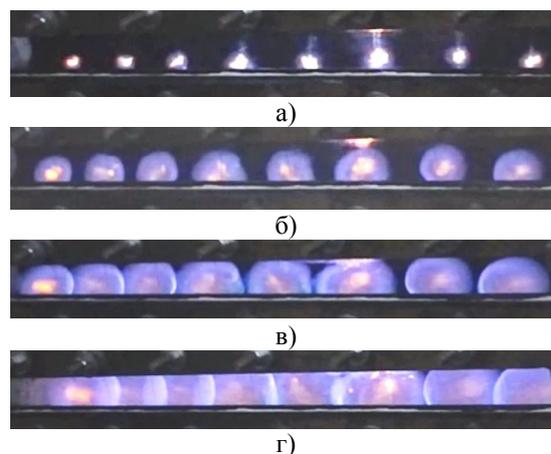


Рис. 5. Фото пламени при стримерном СВЧ зажигании смеси с $\eta = 1$, при $p_0 = 2 \cdot 10^5$ Па: а – поджиг, б – 1/400 с, в – 2/400 с, г – 3/400 с.⁵

На рис.5 показано развитие горения при стримерном зажигании, начиная от момента

зажигания разряда, до момента, когда горение охватывает весь объем камеры. Фронт горения пламени, похож на таковой при искровом зажигании.

Скорость развития горения практически в три раза выше. На рис.6 развитие горения показано через боковое стекло. Очень хорошо видно, что воспламенение происходит сразу в значительном объеме, т.е. как при объемном взрыве. Если пламя при искровом зажигании от момента образования искры (рис.3-а) до момента времени $3/400$ с, показанного на рис.3-б, плавно увеличивается в размере от нуля, то при стримерном образовании в момент $1/400$ с вспышка топливной смеси сразу имеет размер, показанный на рис.5-б, 6-б.

Для сравнения с натурным экспериментом были выполнены численные расчеты искрового и СВЧ зажигания.

Результаты с искровым зажиганием не приводятся, т.к. они совпали с результатами натурного эксперимента.

На рис.7 представлена картина течения при поджигании смеси одним стримерным разрядом, расположенным на боковой поверхности у одного из днищ. При постановке начальных условий производился расчет стримерного разряда, характерной длины стримера и размера разряда.



Рис. 6. Фото пламени через боковое окно при стримерном СВЧ зажигании смеси с $\eta = 1$, при $p_0 = 2 \cdot 10^5$ Па, шаг по времени - $1/400$ с.⁶

Форма разряда полагалась сферической, равномерно покрытой по объему сеткой стримеров. Энергия, подводимая к разряду, выделялась на стримерах. Упрощенно, считалось, что основная энергия, выделяется в узлах стримера, в сферических образованиях, диаметр которых составляет примерно 3 диаметра стримера.

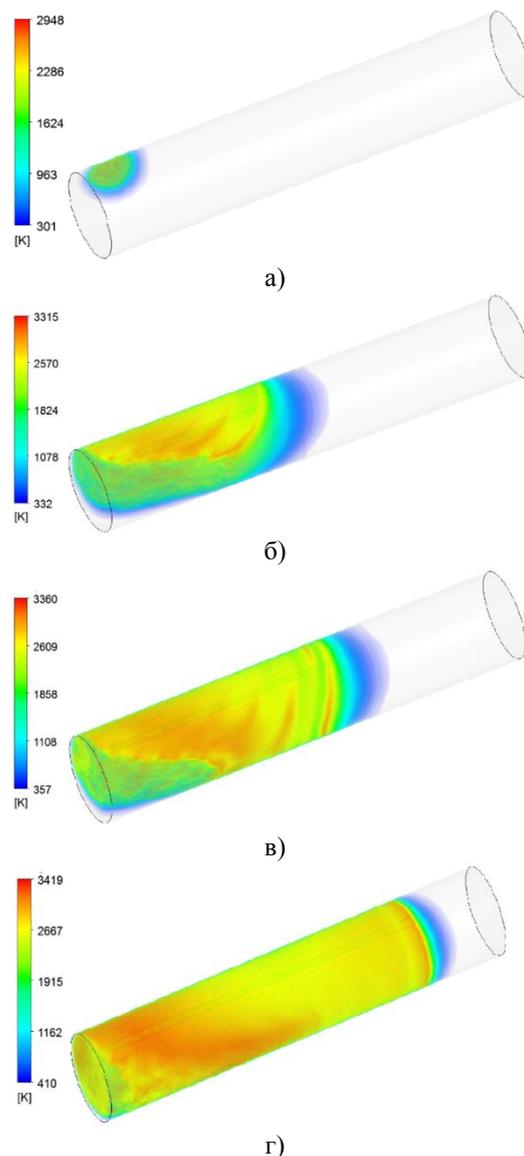


Рис. 7. Результаты численного исследования трансформации фронта горения при искровом зажигании (температура), $p_0=1 \cdot 10^5$ Па, коэффициент избытка горючего $\eta = 1$: а - $0,053$ с, б - $0,056$ с, в - $0,059$ с, г - $0,063$ с.⁷

Расчеты показали, что выделяемая на стримерах энергия приводит к образованию ударных волн достаточно большой интенсивности. Но они быстро затухают, т.к. начальный диаметр плазменного образования имеет порядок $0,001$ м. Нагрев ударными волнами, и

^{6,7} Appendix 1

термодиффузия приводят к постепенному нагреву топливной смеси до температуры около 1000К (рис.7-а). В этот момент происходит вспышка, в которой средняя температура составляет уже 2000 К. По области воспламенения пробегают детонационные волны (оранжевый цвет на рис.6-б), которые поджигают смесь сразу в значительном объеме.

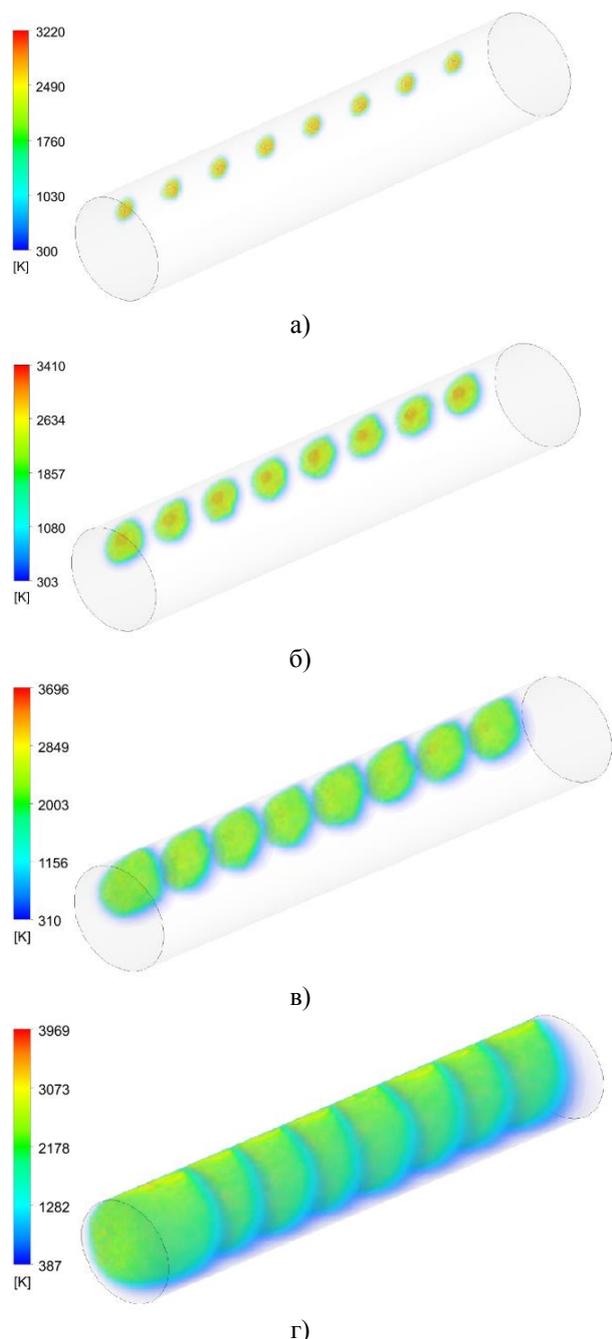


Рис. 8. Результаты численного исследования трансформации фронта горения при стримерном СВЧ зажигании (температура), $p_0=1 \cdot 10^5$ Па, коэффициент избытка горючего $\eta = 1$: а - разряд, б - 1/400 с, в - 2/400 с, г - 3/400 с.⁸

Далее фронт горения распространяется как при поджигании газа в трубе в объеме у одного из днищ, при этом скорость пламени существенно выше, чем при искровом зажигании.

Далее были выполнены численные расчеты поджигания смеси в канале при помощи восьми стримерных разрядов (рис.8).

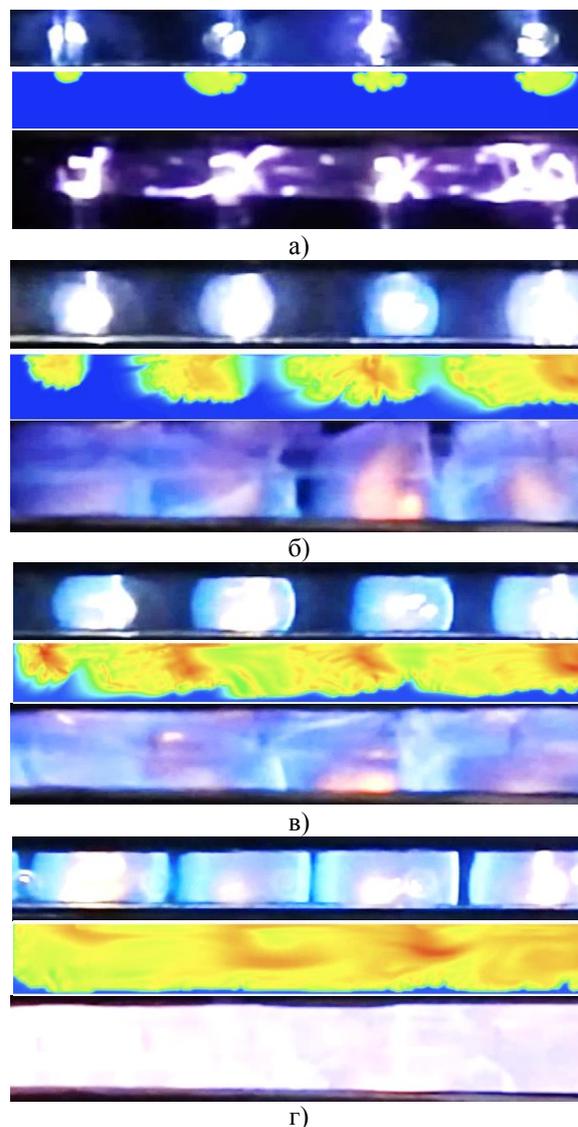


Рис. 9. Сравнение результатов экспериментов с искровым поджиганием смеси (верхнее фото) с результатами расчета стримерного зажигания (средний компьютерный рисунок) и эксперимента со стримерным зажиганием (нижнее фото), 8 центров зажигания (показана половина трубы): а - разряд, б - 3/400 с, в - 6/400 с, г - 9/400 с.⁹

Методика не отличалась от примененной при расчете единичного разряда. Качественно характер воспламенения не отличался от такового при использовании одного разряда.

^{8,9} Appendix 1

Сравнение расчета с экспериментом приведено на рис.9. На каждом фрагменте сверху показано развитие горения искрового зажигания, в середине - результаты расчета горения при стримерном зажигании, внизу - результаты эксперимента при стримерном зажигании. Видно, что результаты расчетов и экспериментов в части скорости развития горения при стримерном зажигании совпадают очень хорошо.

При примерно в 30 раз меньших затратах энергии, СВЧ зажигание обеспечило преимущество в скорости роста давления в цилиндре и скорости сгорания топливной смеси примерно на 25-30%, по сравнению с зажиганием 8 автомобильными свечами. КПД СВЧ зажигания составило 11%. Непосредственно к топливной смеси искрами 8 автомобильных свечей подводилось в 4 раза больше энергии, чем 8 стримерными СВЧ разрядами.

В одном из опытов, при начальном давлении в камере $p_0=2,5 \cdot 10^5$ Па, удалось получить прямую детонацию топливной смеси при подведении к ней стримерным разрядом всего 1,6 Дж. В аналогичных условиях для прямой детонации пропано-воздушной топливной смеси необходимо от 1 до 3 гр тротила, что соответствует примерно $4 \cdot 10^3$ Дж.

Выполненные эксперименты и расчеты при различном коэффициенте избытка горючего η показали, что оптимальной для СВЧ зажигания с точки зрения скорости нарастания давления в камере сгорания, как и для искрового зажигания, являются умеренно богатые топливные смеси $\eta=1-1,1$. Это позволяет сделать вывод, что основным фактором, влияющим на характер воспламенения при стримерном зажигании, является его объемный характер и основной механизм воспламенения - термический. Расширение диапазона зажигания топливной смеси по коэффициенту избытка горючего η при СВЧ зажигании, по сравнению с искровым зажиганием, не наблюдается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнено исследование методов повышения топливной экономичности и эффективности процесса горения в энергетических установках, в ходе которого было осуществлено сравнение результатов расчетов и экспериментов с зажиганием топливной пропано-воздушной смеси 1, 4, 8 искровыми автомобильными свечами и 8 стримерными подкритическими СВЧ разрядами в замкнутом

цилиндре. Влияние ультрафиолета не учитывалось.

Основным результатом является то, что внутри металлического цилиндра удалось зажечь стримерный разряд, а также поджечь им топливную смесь.

Детальное рассмотрение кадров съемки скоростной камерой процесса воспламенения и воспроизведение процесса зажигания в ходе вычислительного эксперимента позволило сделать вывод, что преимущество в скорости сгорания и роста давления получены за счет объемного характера зажигания стримерным СВЧ разрядом с развитой пространственной структурой.

Наиболее существенным научным результатом является то, что эффективность зажигания СВЧ разрядами гораздо выше как точечного, так и многоточечного искрового зажигания.

Практически значимо то, что скорость нарастания давления при многоточечном СВЧ зажигании на треть выше, чем при многоточечном искровом, и в три раза выше, чем при стандартном, а затраты подводимой энергии почти в 30 раз меньше. Это позволяет существенно поднять удельные показатели как двигателей внутреннего сгорания, так и двигателей постоянного объема.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, Соглашение № 14.577.21.0277 (ЭБ 075-15-2019-9 15), уникальный идентификатор прикладных научных исследований – RFMEFI57717X0277.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹Fig.1. The experimental setup.

²Fig.2. Determination of the resonant length of the initiator of a microwave discharge - the dependence of the microwave gas breakdown pressure on the initiator length.

³Fig.3. Photo of the flame during spark ignition of the mixture with $\eta = 1$, at $p_0 = 2 \cdot 10^5$ Pa: a - ignition, b - 3/400 s, c - 6/400 s, g - 9/400 s.

⁴Fig.4. Photo of streamer microwave discharges.

⁵Fig.5. Photo of the flame during streamer microwave ignition of the mixture with $\eta = 1$, at $p_0 = 2 \cdot 10^5$ Pa: a - ignition, b - 1/400 s, c - 2/400 s, g - 3/400 s.

⁶Fig.6. Photo of the flame through the end window during streamer microwave ignition of the mixture with $\eta = 1$, at $p_0 = 2 \cdot 10^5$ Pa, time step - 1/400 s.

Fig.7. The results of a numerical study of the transformation of the combustion front during spark ignition (temperature), $p_0 = 1 \cdot 10^5$ Pa, the fuel surplus ratio $\eta = 1$: a - 0,053 s, b - 0,056 s, c - 0,059 s, g - 0,063 s.

Fig.8. The results of a numerical study of the transformation of the combustion front during streamer microwave ignition (temperature), $p_0 = 1 \cdot 10^5$ Pa, the fuel ratio $\eta = 1$: a - discharge, b - 1/400 s, c - 2/400 s, g - 3/400 s.

Fig.9. Comparison of the results of experiments with ignition of the mixture (upper photo) with the results of calculating streamer ignition (middle computer figure) and experiment with streamer ignition (bottom photo), 8 centers of ignition (half pipe is shown): a - discharge, b - 3/400 s, c - 6/400 s, g - 9/400 s.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

1. Khodataev K.V. The Ignition of the Combustion and Detonation by the Undercritical Microwave Discharge. AIAA Plasmadynamics and Laser Conference, 32nd, and Weakly Ionized Gases Workshop, 4th, Anaheim, CA. Jun 11-14, 2001. AIAA Paper 2001-2941.
2. Viktorovich, B.P. About the detonation engine. American Journal of Applied Sciences, 2014. 11(8), c. 1357-1364.
3. Uskov, V.N., Bulat, P.V. Shock and detonation wave in terms of view of the theory of interaction gasdynamic discontinuities. Life Science Journal, 2014. 11(SPEC. ISSUE 8), c. 307-310.
4. Brent A. Rankin, Matthew L. Fotia, Andrew G. Naples, Christopher A. Stevens, John L. Hoke, Thomas A. Kaemming, Scott W. Theuerkauf, Frederick R. Schauer. Overview of Performance, Application, and Analysis of Rotating Detonation Engine Technologies. JOURNAL OF PROPULSION AND POWER. DOI: 10.2514/1.B36303.
5. Xie Q., Wang B., Wen H., Wolanski P., Enhancement of continuously rotating detonation in hydrogen and oxygen-enriched air, Proc. Combust. Inst. 37 (2019) 3425–3432.
6. Frolov S.M., Aksenov V.S., Ivanov V.S., Shamsin I.O., Large-scale hydrogen–air continuous detonation combustor, Int. J. Hydrogen Energy. 40 (2015). 1616–1623. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.11.112>.
7. Zhao, N.B.; Zheng, H.T.; Wen, X.Y.; Zhao, N.B.; Zheng, H.T.; Wen, X.Y.; Xiao, D.M. Thermodynamic performance enhancement of marine gas turbine by using detonation combustion. In Proceedings of the ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, ASME, Oslo, Norway, 11– 15 June, 2018; GT2018-75493, 2018.
8. Wolański, P. Detonative propulsion. *Proc. Combust. Inst.* **2013**, *34*, 125–158.
9. Liu, Y.; Sun, X.; Sethi, V.; Nalianda, D.; Li, Y.G.; Wang, L. Review of modern low emissions combustion technologies for aero gas turbine engines. *Prog. Aerosp. Sci.* **2017**, *94*, 12–45.
10. Q. Xie, H. Wen, W. Li, Z. Ji, B. Wang, P. Wolanski, Analysis of operating diagram for H2/Air rotating detonation combustors under lean fuel condition, *Energy*. 151 (2018) 408–419.
11. Bulat P.V., Esakov I.I., Grachev L.P., Denissenko P.V., Bulat M.P., Volobuev I.A. Modeling and simulation of combustion and detonation by subcritical streamer discharge. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 569–592 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-569-592
12. Bulat M.P., Bulat P.V., Denissenko P.V., Esakov I.I., Grachev L.P., Volkov K.N., Volobuev I.A. Ignition of lean and stoichiometric air-propane mixture with a subcritical microwave streamer discharge. *Acta Astronautica*. 2018. Vol. 150. P. 153-161. DOI: 10.1016/j.actaastro.2017.11.030.
13. M.L. Fotia, J. Hoke, F. Schauer, Study of the ignition process in a laboratory scale rotating detonation engine, *Exp. Thermal Fluid Sci.* 94 (2017) 345–354.
14. R. Bluemner, M.D. Bohon, C.O. Paschereit, E.J. Gutmark, Single and counter-rotating wave modes in an RDC, 2018 AIAA Aerospace Science Meeting, American Institute of Aeronautics and Astronautics (2018).
15. Sousa, J.; Paniagua, G.; Morata, E.C. Thermodynamic analysis of a gas turbine engine with a rotating detonation combustor. *Appl. Energy* **2017**, *195*, 247–256.
16. Uskov, V.N., Bulat, P.V., Arkhipova, L.P. Classification of gas-dynamic discontinuities and their interference problems. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2014, 8(22), c. 2248-2254.
17. Bulat, P.V., Chernyshev, M.V. Existence regions of shock wave triple configurations. *International Journal of Environmental and Science Education*, 2016, 11(11), c. 4844-4854.
18. Gray, J.; Vinkeloe, J.; Moeck, J.; Paschereit, C.O. Thermodynamic evaluation of pulse detonation combustion for gas turbine power cycles. In Proceedings of the Turbomachinery Technical Conference and Exposition, ASME Turbo Expo, Seoul, Korea, 13–17 June 2016.
19. Lisanti, J.C.; Roberts, W.L. Design of an actively valved and acoustically resonant pulse combustor for pressure-gain combustion applications. In Proceedings of the 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, San Diego, CA, USA, 4–8 January 2016.
20. Xisto, C.; Ali, F.; Petit, O.; Grönstedt, T.; Rolt, A.; Lundbladh, A. Analytical model for the performance estimation of pre-cooled pulse detona-

- tion turbofan engines. In Proceedings of the Turbomachinery Technical Conference and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, ASME Turbo Expo 2017, Charlotte, NC, USA, 26–30 June 2017.
21. Chan, S.; Liu, H. Mass-based design and optimization of wave rotors for gas turbine engine enhancement. *Shock Waves* **2017**, 27, 313–324.
 22. Bulat, M.P., Bulat, P.V. The analysis centric isentropic compression waves. *World Applied Sciences Journal*, 2013, 27(8), c. 1023-1026.
 23. Lei Peng, Dong Wang Xiaosong Wu, Hu Ma, Chenglong Yang. Ignition experiment with automotive spark on rotating detonation engine. *International Journal of Hydrogen Energy*. Volume 40, Issue 26, 13 July 2015, Pages 8465-8474. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.126>.
 24. P. Denissenko, M.P. Bulat, I.I. Esakov, L.P. Grachev, K.N. Volkov, I. A. Volobuev, V.V. Upyrev, P.V. Bulat. Ignition of premixed air/fuel mixtures by microwave streamer discharge. *Combustion and Flame* 202 (2019) 417–422. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.01.029>.
 25. Bulat M.P., Bulat P.V., Denissenko P.V., Esakov I.I., Grachev L.P., Volkov K.N., Volobuev I.A. Ignition and combustion of air/fuel mixture in a long tube induced by microwave subcritical streamer discharge. *Acta Astronautica*. Volume 150, September 2018, Pages 153-161. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.11.030>.
 26. Bulat M., Bulat P., Denissenko P., Esakov I., Grachev L., Volkov K., Volobuev I. Experimental study of microwave streamer discharge ignition of premixed air/fuel mixtures. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 47(1),8493512, c. 57-61.
 27. Starikovskiy A., Aleksandrov N. Plasma-assisted ignition and combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2013, vol. 39., pp. 331-368.
 28. Bulat P.V., Minin O.P., Volkov K.N. Numerical simulation of optical breakdown in a liquid droplet induced by a laser pulse. *Acta Astronautica*. Volume 150, September 2018, Pages 162-171. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.11.029>.
 29. Bulat, M., Bulat, P., Denissenko, P., Volkov, K., Volobuev, I. Numerical simulation of ignition of premixed air/fuel mixtures by microwave streamer discharge. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 47(1),8479354, c. 62-68.

Сведения об авторах.



Лавров Павел Борисович.
Кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории физики плазмы АО «МРТИ РАН». Область научных интересов: физика плазмы, СВЧ разряды.
E-mail: lpbmos@yandex.ru



Продан Николай Васильевич.
Кандидат физико-математических наук. Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова. Область научных интересов: газовая динамика.
E-mail: kolinti@mail.ru



Ильина Екатерина Евгеньевна. Научный сотрудник Университета ИТМО. Область научных интересов: газовая динамика.
E-mail: il-190.89@mail.ru



Чернышов Павел Сергеевич.
Студент магистратуры Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова. Область научных интересов: вычислительная газовая динамика.
E-mail: pashachp8@gmail.com