# Method for Burning Super-Poor Fuel Mixtures in the Combustion Chamber of the Energy Microturbine by Means of the Streamer Discharge

Grachev L.P.<sup>1</sup>, Bulat P.V.<sup>2,3</sup>, Esakov I.I.<sup>1</sup>, Bulat M.P.<sup>2</sup>, Volobuev I.A.<sup>3</sup>, Upyrev V.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moscow Radiotechnical Institute of the Russian Academy of Sciences

Moscow, Russian Federation,

<sup>2</sup> Baltic State Technical University VOENMEH, Saint-Petersburg, Russian Federation
<sup>3</sup> Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University), Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract. The paper considers the problem of increasing fuel efficiency and reducing emissions of gas turbine power plants. The aim of the work is to develop a method for burning extra-lean fuel mixtures. The method of ignition by a streamer high-frequency discharge was considered. The discharge was ignited in the presence of the resonator by a quasioptical beam of microwave radiation with a wavelength of 8.9 - 12.5 cm. The resonant ignition method was 20 to 100 times more energy efficient than laser and plasma ignition methods. The method combines an experiment and mathematical modeling of a streamer discharge. The result was the ignition of an extremely lean mixture with an air fuel rate of more than 30. A regime of flameless combustion was detected, when a flame wasn't visible, but heat generation as a result of a chemical reaction has occurred. Stable combustion of the lean mixture was obtained at a flow rate of up to 30 m/s. These conditions simulated combustion in a tubular combustion chamber. A pulse with a wavelength of about 2.5 cm couldn't create a streamer discharge and couldn't be used for multi-point ignition. Burning front speed was 2-4 times higher than in spark ignition. Traditional low-emission combustion chambers have large dimensions and a very complex design. This makes it difficult to use them in microturbine. The application of the method described in the article makes it possible to create significantly more compact low-emission and highly economical combustion chambers for power gas turbine plants.

*Keywords:* microturbine, lean burn, low-emission combustion chamber, microwave discharge, streamer discharge, non-equilibrium plasma.

**DOI:**10.5281/zenodo.1343414

Metoda de ardere a amestecilor de combustibil super-sărace în camerele de ardere a turbinei micro-energetice cu utilizarea descărcării strimer Gracev L.P.<sup>1</sup>, Bulat P.V.<sup>2,3</sup>, Esacov I.I.<sup>1</sup>, Bulat M.P.<sup>2</sup>, Volobuev I.A.<sup>3</sup>, Upirev V.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>SA Institutul radiotehnic din Moscova a Academiei de Științe din Rusia

Moscova, Federația Rusă,

<sup>2</sup>Universitatea tehnică de Stat baltică "VOENMEH",

Sankt-Petersburg, Federația Rusă,

<sup>3</sup> Universitatea națională de cercetări în tehnologii informaționale,

mecanică și optică din Sankt-Petersburg (Universitatea ITMO)

Sankt-Petersburg, Federația Rusă

**Rezumat.** Lucrarea este dedicată subiectului creșterii efectului economic al combustibilului și reducerii cantităților de emisii de la echipamentele energetice cu turbine pe gaz. Tradițional, problema se soluționează prin arderea amestecurilor deosebit de sărace, care pot fi inflamate cu greu, ard prost, deseori, cu apariția situațiilor de avarie de tip salt al flăcării și ardere vibrantă. Scopul lucrării - descoperirea metodelor de ardere stabilă a acestor amestecuri. Atingerea scopului se datorează elementului de inflamare în volum și a menținerii arderii cu ajutorul descărcării strimer sub-critică de frecvență foarte înaltă. Descărcarea se produce în prezența inițiatorului cu fascicul quasi-optic de radiație cu microunde cu lungimea de 8,9-12,5 cm. Un element considerabil al inovației este utilizarea pentru aprindere a metodel de rezonanță la inițierea descărcării, care are un efect economic de 20-100 ori mai mare în comparație cu metodele de aprindere cu plasmă și totodată, stabilizează arderea. Metoda de cercetare combină experimentul cu modelarea matematică a descărcării strimer. A fost obținută arderea stabilă a amestecului sărac de combustibil în fluxul sub-sonor la viteza de 30 m/s la instalația, ce imite o cameră de ardere tubulară. A fost descoperit, că impulsurile de radiație cu lungime mică de undă de ordinul 2,5 cm nu sunt capabile de a crea o structură dezvoltată în volum a descărcării, prin urmare, ele sunt lipsite de perspectivă pentru arderea în volum. În experimentele la energia actualizată egalată a fost obținută creșterea vitezei propagării flăcării de la 2,4 până la 4 ori în comparație cu inflamația prin scânteie.

Cuvinte-cheie: microturbină, arderea amestecurilor sărace de combustibil, cameră de ardere cu emisii mici,

© Грачев Л.П., Булат П.В., Есаков И.И., Волобуев И.А., Упырев В.В., 2018

#### PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE 2 (37) 2018

descărcare cu microunde, descărcare strimer, plasmă neechilibrată.

# Способ сжигания сверхбедных топливных смесей в камерах сгорания энергетической микротурбины с помощью стримерного разряда

Грачев Л.П.<sup>1</sup>, Булат П.В.<sup>2,3</sup>, Есаков И.И.<sup>1</sup>, Булат М.П.<sup>2</sup>, Волобуев И.А.<sup>3</sup>, Упырев В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО Московский радиотехнический институт российской академии наук

Москва, Российская Федерация,

<sup>2</sup>Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ», Санкт-Петербург, Российская Федерация,

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий,

механики и оптики (Университет ИТМО),

Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Работа посвящена проблеме повышения топливной экономичности и снижения вредных выбросов газотурбинных энергетических установок. Традиционно, проблема решается путем сжигания особо бедных топливных смесей, которые с трудом воспламеняются, плохо горят, часто, с возникновением аварийных явлений типа проскока пламени и вибрационного горения. Цель работы найти способ устойчивого сжигания таких смесей. Поставленная цель достигается за счет объемного воспламенения И поддержания горения при помощи резонансного подкритического сверхвысокочастотного стримерного разряда. Разряд зажигается в присутствии инициатора квазиоптическим пучком микроволнового излучения с длиной волны 8.9 - 12.5 см. Существенным элементом новизны является использование для зажигания резонансного способа инициирования разряда, который в 20 - 100 раз экономичнее известных плазменных способов зажигания и стабилизации горения. Метод исследования сочетает эксперимент с математическим моделированием стримерного разряда. Проведенные эксперименты показали гарантированное зажигание бедной топливной смеси на нижней теоретической границе воспламенения с коэффициентом избытка пропана менее 0.55. Обнаружен режим беспламенного горения, когда пламени не видно, но регистрируется выделение тепла в результате экзотермической реакции. Получено устойчивое горение бедной смеси в дозвуковом потоке на скорости до 30 м/с на установке, имитирующей трубчатую камеру сгорания. Обнаружено, что импульсы излучения с малой длиной волны порядка 2.5 см не способны создавать развитую пространственную структуру разряда, следовательно, они бесперспективны для объемного зажигания. В экспериментах при равной подведенной энергии получено увеличение скорости распространения пламени от 2.5 до 4 раз по сравнению с искровым зажиганием. Традиционные малоэмиссионные камеры сгорания имеют большие габариты и весьма сложную конструкцию. Применение описанного в статье метода позволяет создавать существенно более компактные камеры сгорания для энергетических микротурбин.

*Ключевые слова*: микротурбина, сжигание бедных топливных смесей, малоэмиссионная камера сгорания, СВЧ-разряд, стримерный разряд, неравновесная плазма.

#### Введение

Работа посвящена проблеме сжигания бедных и экстремально бедных топливных смесей. В настоящей работе рассматривается сжигание предельно бедных топливных смесей в присутствии подкритического стимерного разряда. Последние тридцать лет сжигание бедных смесей рассматривается как основной способ снижения вредных выбросов в атмосферу и улучшения экономичности газотурбинных и газопоршневых энергетических установок.

Наиболее полный обзор проблемы приведен в статье академика О.Н.Фаворского [1], а также монографии [2]. Известны три основных способа организации горения: факельный (диффузное смешение топлива и окислителя), сжигание предварительно перемешанных смесей и каталитическое горение [3]. Введение катализатора позволяет снизить температуру горения до 1200...1500 К и снизить за счет этого выбросы NO<sub>x</sub> на порядок [4]. В будущем это может стать основным способом снижения выбросов у больших авиационных газотурбинных двигателей и наземных индустриальных турбин. В настоящее время, основным способом повышения топливной экономичности и снижения выбросов в атмосферу у обычных газотурбинных установок является переход к сжиганию все более бедных топливных смесей с большим избытком окислителя (AFR – air fuel rate). Значение AFR ограничено [5, 6] областью неустойчивых режимов типа проскоков пламени и вибрационного горения (рис. 1). Механизмы образования NO<sub>x</sub> и способы уменьшения концентрации оксидов азота рассмотрены в работе [7].

Последние сводятся, в основном, к уменьшению температуры сжигания топлива, предельному обеднению смеси, уменьшению времени пребывания продуктов сгорания в области высоких температур и «закалке» NO<sub>x</sub> по механизму быстрого охлаждения, когда скорость реакции окисления существенно уменьшается [8, 9].



Рис.1. Качественная зависимость скорости образования NO<sub>x</sub> от температуры пламени и от отношения количества воздуха к количеству топлива (AFR – air tofuel ratio).

Перечисленные выше способы приводят к нескольким техническим решениям [10], позволяющим создавать малоэмиссионные камеры сгорания (МЭКС): сжигание в предварительной камере (форкамере) богатой смеси с последующим быстрым подмешиванием холодного воздуха ROL (Reach Quench Lean); сжигание обедненной предварительно перемешанной смеси LPP/LDI (Lean Premixed Prevaporized/Lean Direct Injection). Традиционные МЭКС имеют большие габариты и весьма сложную конструкцию, предусматривающую многостадийное горение. Это затрудняет их применение в микротурбинах, поэтому рассматриваются различные способы укорачивания МЭКС [11] и увеличения скорости сгорания топлива [12].

В последние годы появились новые задачи, связанные со сжиганием биоотходов, биотоплива [13], синтетических топлив, попутного газа, продуктов пиролиза тяжелых углеводородов. Они вызвали серию исследований по новым способам организации сжигания топлив. Среди них: горение, стимулируемое низкотемпературной неравновесной плазмой [14, 15], в том числе и низкотемпературное сжигание ультрабедных топливовоздушных смесей [16], плазмохимический пиролиз, газификация и сжигание низкокалорийных топлив [17].

Активно ведутся исследования в направлении стабилизации горения бедной смеси при помощи холодной неравновесной плазмы [18, 19]. Основные сведения о физике плазмы в разрезе её использования для экономичного сжигания топлива приведены в монографии [20], обзорной работе [21]. Применение сверхвысокочастотных разрядов (СВЧ) позволяет расширить обычно очень узкий диапазон параметров устойчивого горения бедной топливной смеси [22, 23]. Для этого используют серию следующих друг за другом в квазинепрерывном режиме импульсов [24] или непрерывно горящие коронные разряды [25]. Достаточно полный обзор работ в области плазменного горения приведен в [26, 27].

Возбуждение в холодной неравновесной плазме атомов кислорода увеличивает скорость распространения диффузного пламени, что позволяет не только стабилизировать пламя и расширить пределы горения [28], но и увеличить скорость и полноту сгорания топлива, что также положительно влияет на образование окислов азота  $NO_x$  [29]. СВЧ разряды весьма устойчивы и не гаснут в высокоскоростных потоках [30], что делает перспективным их применение в системах стабилизации горения [31], трубчатых проточных камерах авиационных двигателей.

Основным недостатком методов организации горения в присутствии плазмы являются высокие затраты энергии на электромагнитный (ЭМ) пробой и ионизацию среды. Используемые для зажигания микро- и наносекундные импульсы микроволнового и лазерного излучения потребляют огромные мощности из-за низкого коэффициента полезного действия источников и высоких пороговых значений пробоя газовой среды [32]. Непосредственное использование лазерного пробоя отличается еще и низкой эффективностью самого процесса испарения капли топлива и образования плазменного ореола [33]. С этим пробуют бороться, объединяя подкритические разряды с импульсами лазера [34]. В настоящей работе используется метод инициирования стримерных разрядов в условиях резонанса при подкритическом уровне поля. Этот метод на один - два порядка экономичнее, чем методы, перечисленные выше. В этом состоит новизна и преимущество по сравнению с методами, описанными выше.

Стримерными называются разряды, состоящие из множества плазменных каналов, которые образуют в пространстве или на поверхности причудливую сетку (рис. 2). Энергия пробоя зависит от давления среды [35] и рода газа. Если сходная энергия источника излучения ниже энергии пробоя, то зажигаемый в таком поле разряд называется подкритическим. Внешний вид и характер поведения разряда сильно зависит от напряженности электрического поля и может принимать вид древовидного образования или диффузного облака, когда стримеры не выходят за его пределы [36]. Наличие в исходном поле диэлектрических поверхностей (рис. 26 и рис. 2в), позволяет разрядам распространятся вдоль них навстречу вектору напряженности поля [37]. Скорость его распространения при этом многократно увеличивается. Стримерный разряд обладает способностью присоединяться даже к диэлектрической сетке (рис. 2г), что позволяет придавать ему произвольную форму.



Рис.2. Стримерный СВЧ разряд в свободном пространстве (а), на поверхности из текстолита (б) и стекла (в), на капроновой сетке (г).

Ниже рассматривается два альтернативных способа: воспламенение неподвижной бедной смеси импульсным разрядом на внутренней цилиндрической поверхности, а также поджигание потока топливной смеси и струи топливной смеси в спутном потоке воздуха квазинепрерывным присоединенным к инициатору разрядом.

## **І. ОБОРУДОВАНИЕ**

Для проведения экспериментов использовалось оборудование, позволявшее зажигать СВЧ-разряды в движущейся топливной смеси и в неподвижной среде. В первом случае применялся микроволновый генератор на основе магнетрона. Рабочая длина волны излучения  $\lambda = 12.33$  см. Мощность излучения могла регулироваться ступенчато от  $P_{gen} =$ 200 Bt до 2 кВт. Режим работы – квазинепрерывный, длительность импульса лимитировалась только требованиями эксперимента и могла регулироваться от 0.1 с и более. Для изучения горения, инициированного присоединенным разрядом в медленном сносящем потоке воздуха, использовалась установка, изображенная на рис. За. Она позволяла проводить неограниченные по времени исследования при скорости потока воздуха и до 50 м/с, который создавался вентилятором при атмосферном давлении. Установка, изображенная на рис. 36, представляет собой импульсную аэродинамическую трубу вакуумного типа. Она позволяла создавать в течение нескольких секунд поток предварительно перемешанной топливной смеси со скоростью от 10 до 500 м/с. Скорость струи топливной смеси регулировалась полным давлением  $p_{\Sigma}$  смеси в ресивере. Для зажигания разряда в обоих случаях использовался цилиндрический вибратор с закругленными концами (рис. 4а). Длина и радиусы скруглений концов резонатора были определены расчетным путем и экспериментально по методике, описанной ниже в разделе II. Кроме того, использовался трубчатый инициатор с кварцевой насадкой (рис. 4б), через который можно было прокачивать с заданным полным давлением предварительно подготовленную топливную смесь пропана и воздуха. Сама трубка помещалась во внешний спутный поток воздуха, создаваемого вентилятора. Оптимальные размеры трубчатого инициатора также были определены экспериментально. Температура в поле факела или разряда измерялась термопарой, установленной в трубке на расстоянии 30 мм от среза инициатора. Описанное выше оборудование позволяло изменять напряженность ЭМ поля в фокусе, зажигать разряды разной интенсивности, обдувать эти разряды воздухом, подготовленной топливной смесью или компактной струей топливной смеси в спутном воздушном потоке, что имитировало разные схемы камер сгорания.

Установка для изучения инициирования горения в неподвижной среде (рис. 5) была оснащена генератором непрерывного типа с  $\lambda$  = 12.5 см и импульсным генератором с  $\lambda$  = 8.9 см и длительностью СВЧ импульса  $\tau_{umn}$  =



но поляризованный СВЧ пучок.



Рис. 3. Принципиальная схема экспериментальных установок с квазинепрерывным излучением на длине волны λ = 12.5 см, предназначенных для изучения инициирования горения в медленных дозвуковых (а) и скоростных трансзвуковых потоках (б).



Рис. 4. Трубка с кварцевым инициатором разряда (а) и термопара для измерения температуры (б).

Пучок фокусировался зеркалом диаметром 600 мм на области с инициатором разряда. В фокус помещалась кварцевая трубка. Внутри трубки располагался инициирующий СВЧ пробой вертикальный электромагнитный вибратор, представляющий такой же цилиндр с закругленными концами, как описано выше. Его расстояние от среза зеркала равнялось 110 мм. Максимальная амплитуда напряженности электрического поля в фокусе пучка  $E_0 = 0.5$  кВ/мм. Эти значения соответствовали мощности пучка приблизительно  $P_{CBY} = 1.5$  МВт. Мощность с помощью аттенюатора могла изменяться в пределах от  $10^2$  Вт до  $\approx 10^6$  Вт.

Трубка заполнялась предварительно подготовленной смесью пропана с воздухом. С одной стороны, на трубке помещался клапан-ниппель, позволяющий предотвратить разрушение трубки при чрезмерном повышении давления в ней. Клапан срабатывает

при перепаде давления в 1300 Торр. С другой стороны, присоединялся измеритель давления 24РССГА6Д. Длина рабочей части трубки 400 мм, внутренний диаметр 30 мм. Распространение фронта пламени фиксировалось на камеру Phantom v.2511, имеющую скорость съемки до 750.000 кадров/сек, что позволяло фиксировать скорость пламени с высокой точностью. Для более точной фиксации скорости распространения пламени на трубку надевался шарик, заполненный топливной смесью. Выход фронта пламени в объем шарика сопровождался взрывом, который был отчетливо виден и легко фиксировался на видео. Показания термопары и датчика давления выводились на экран осциллографа, показания которого записывались при помощи скоростной фотокамеры. Скоростная камера позволяла фиксировать во всех деталях распространение стримерно-



волнами.



Рис. 5. Схема импульсной установки с  $\lambda = 8.9 / 12.5$  см.

# **II. МЕТОД**

При анализе процессов в газовых электрических разрядах вводят понятие критического поля Екр. Это минимальное поле пробоя газа при данном давлении р. Для сжигания разряда при уровне исходного поля Е0<Екр пробой газа должен быть инициирован [38]. В настоящей работе для инициации пробоя использует линейный электромагнитный (ЭМ) вибратор.Для инициатора разряда, условная геометрия которого показана на рис. 4а, по методике [39] были рассчитаны энергия пробоя в свободном пространстве (рис. 6а), а затем давление пробоя при напряженности поля  $E_0 = 25 \text{ B/мм}$  в свободном пространстве и в присутствии экрана, расположенного на переменном расстоянии h(рис. 6б). Значения, полученные расчетным путем, были проверены по методике экспериментального определения энергии пробоя газовой среды в присутствии и инициатора и экрана, изложенной в [38]. Видно (рис.6), что у вибратора резонансной длины поле на его вершинах в сотни раз превышает исходное поле. Это позволяет осуществлять эффективный пробой при исходном уровне поля *E*<sub>0</sub><*E*<sub>кр</sub>. В работе [39] подробно описан механизм эффективного резонансного взаимодействия стримерного разряда с возбуждающим разряд СВЧ полем. Показано, что стример сам является полуволновым ЭМ вибратором. Это позволяет при подкритическом уровне поля создавать развитую пространственную структуру разряда. Другие типы разрядов такими свойствами не обладают, хотя в настоящее время эффекэнергии тивность использования при надкритических наносекундных импульсах достигается 85-90%. Для поджигания топливной смеси необходимо инициирование химических цепных реакций, для чего требуется не нагрев, а диссоциация молекул газа. В то же время хорошо известно, что диссоциация через тепловой нагрев газа самый низкоэффективный способ создания начальных радикалов. Диссоциация прямым электронным ударом в сильных электрических полях на порядки эффективнее.

В работе [40] по методикам, описанным в [39] были выполнены расчеты и эксперименты, позволившие установить характерные скорости роста стримеров и скорости распространения фронта разряда. Было также установлено, что в узлах стримерного разряда развиваются мощные электронные лавины даже при наличии в газовой среде одного свободного электрона. Температура плазмы в узлах стримеров достигается десятков тысяч градусов. В узлах инициируются ударные волны со степенью сжатия не ниже 10. Ударные волны распространялись в области разрядной плазмы со скоростями 6-8 км/с, что позволяло считать дополнительное сжатия и прогрев топливной смеси мгновенным, а воспламенение, по существу, объемным, в отличие от разрядов иных типов. Высокая скорость стримерного разряда, достигавшая в свободном пространстве 5 км/с и 15 км/с на поверхности диэлектрика, позволяет считать воспламенение мгновенным и многоточечным. Время индукции (30-60 мс) на 3 порядка больше времени импульса. (10-40 мкс).



Рис.6. Резонансные кривые для цилиндрических вибраторов в свободном пространстве с заданными значениями радиуса, λ = 12.3 см, E<sub>0</sub> = 25 В/мм.

# Ш. РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ

Рассмотрим результаты инициирования зажигания стримерным разрядом на внутренней поверхности цилиндрической трубки. Приготовление топливной смеси производилось следующим образом. Из трубки откачивался воздух до 3 Торр. Затем в трубку подавался пропан до заданного давления. После этого трубка заполнялась воздухом до атмосферного давления  $p_{\Sigma} = 1$ . Разряд зажигался в топливной смеси. Повышение давления регистрировалось датчиком давления (рис. 7). Черная линия показания при запуске стримерного разряда в трубке, наполненной воздухом. Коэффициент избытка топлива  $\alpha = 0.53$  соответствует парциальному давлению пропана  $p_0$ = 15 Topp,  $\alpha = 0.67 - давлению p_0 = 18$ Topp,  $\alpha = 0.78 - p_0 = 21$  Topp,  $\alpha = 0.89 - p_0 =$ 24 Торр и стехиометрическая смесь  $\alpha = 1.0$ при  $p_0 = 27$  Торр - линия оливкового цвета. При α<0.5 воспламенение не происходит.



#### Рис.7. Показания датчика давления при поджигании в кварцевой трубке смеси пропана с воздухом.

При  $p_0 = 15 Topp$  повышение давления выше, чем при разряде в воздухе. Это свидетельствует о наличии горения в трубке. При этом пламени не видно (рис.8а), т.е. горение носит беспламенный характер. Увеличение а приводит к появлению фронта пламени (рис.8в, г).



Рис.8. Поджигание топливной смеси в кварцевой трубке длинной рабочей части 400 мм, внутренним диаметром 30 мм, инициированное стримерным разрядом при парциальном давлении пропана: a) - 15 Торр, α = 0.53, б) - 18 Торр, α = 0.67, в) - 21 Торр, α = 0.78, г) 24 Торр, α = 0.89.

Были выполнены оценки полноты сгорания топлива. Для этого показания термопары сравнивались с результатами расчета по формуле, предполагающей 100% сгорания топлива

$$DT_{C_{3}H_{8}} = \frac{1}{c_{p}} \frac{\rho_{C_{3}H_{8}}}{\rho_{S} - \rho_{C_{3}H_{8}}} \frac{\Gamma_{C_{3}H_{8}}}{\Gamma_{air}} q, \qquad (1)$$

где  $c_p$  - удельная теплоемкость при постоянном давлении,  $\rho$  - плотность воздуха (*air*) и пропана ( $C_3H_8$ ), q - удельная теплотворная способность пропана 4.64•10<sup>4</sup> Дж/г.

На рис.7 видно, что при  $\alpha = 0.5$  скачок температуры примерно в два раза ниже, чем при сгорании богатых смесей. Как будет показано ниже, бедные и особо бедные смеси горят только непосредственно в среде разрядной плазмы. Разряд на рис.8а занимает примерно 2/5 длины трубки и в остальной части трубки смесь просто не горит. Был сделан вывод, что особо бедные смеси для их полного сжигания необходимо прокачивать через область разрядной плазмы. Для проверки этой гипотезы были выполнены эксперименты с движущейся топливной смесью.

Сначала были выполнены эксперименты с поджиганием движущегося плоского потока топливной смеси глубоко подкритическим разрядом. В таком разряде стримеры также существуют, но не способны покинуть пределы диффузного плазменного образования, т.к. их длина меньше резонансной. Задачей исследования являлось определение возможности обеспечения стабильного горения бедной смеси при её прокачивании через область разрядной плазмы.

Эксперименты проводились следующим образом. Дроссельная заслонка устанавливалась в положение, обеспечивающее скорость потока на срезе сопла 30 м/с. После открытия клапана воздуха и клапана пропана СВЧ разряд поджигался через 0.1 с. Заряд горел 0.4 с. Клапан пропана перекрывался через 0.5 с, клапан воздуха – через 0.8 с. Схема инициатора заряда показана на рис.9а. На рис.9б показан разряд в воздухе. Он имеет розовый цвет. При начальном стехиометрическом соотношении топлива и воздуха получен яркий факел (рис.9в), светящийся голубым цветом, характерным для полного сжигания пропана. Розовое свечение видно только на поверхности резонаторов. Участок роста температуры на показаниях термопары имеет выгнутую форму, характерную для горения. Цена деления по времени – 0.1 с. При поджигании обедненной смеси с коэффициентом избытка топлива  $\alpha = 0.7$  длина факела уменьшается, но характер горения принципиально не изменяется (рис.9г). И наконец, при подаче очень бедной смеси с коэффициентом избытка топлива  $\alpha = 0.5$  пламя еще более укорачивается, а область свечения приобретает розоватый оттенок (рис.9д). При меньшем содержании пропана смесь не горит, картина, как на рис.96.



Рис.9. Присоединенный разряд в смеси пропана с воздухом со скоростью потока 30 м/с: а) - схема инициатора разряда, б) - разряд в воздухе, в) - горение стехиометрической смеси, коэффициент избытка топлива  $\alpha = 1$ , начальное давление p = 3.3 бар; г) - горение бедной смеси,  $\alpha = 0.7$ , p = 1 бар; д) - горение особо бедной смеси при  $\alpha = 0.5$ , p = 0.3 бар. Цена деления осциллографа - 100°С. h = 5 мм.

На рис.9 хорошо видно, что при горении богатой смеси пламя распространятся и в поперечном направлении, а бедные смеси с  $\alpha < 0.5$  (рис.9д) горят строго в следе присоединенного к инициатору разряда.

Далее были выполнены эксперименты на установке, схема которой приведена на рис.За с инициатором - кварцевой трубкой (рис.4б), через которую подавалась подготовленная смесь. Инициатор помещался в сносящий воздушный поток со скоростью иот 5 м/с до 30 м/с, создаваемый вентилятором. Результаты эксперимента приведены на рис.10 для u = 11 м/с. Вентилятор дует слева. Разряд зажигается внутри кварцевой трубки на пилообразной кромке металлической трубки (рис.4б), играющей роль резонатора. Воспламенение смеси происходит внутри трубки. Виден факел горящей топливной смеси с помещенной в неё термопарой, показания которой приведены справа на каждом фрагменте. Шкала температуры t на рис.10 направлена вниз. Под каждым фото приведены значения α. На первом фрагменте показано фото и показания термопары при разряде в чистом воздухе.

Показания термопары на оси струи, приведенные на рис.10 справа от каждой фотографии, демонстрируют, что даже при  $\alpha =$ 0.24 скачок температуры больше, чем при разряде в чистом воздухе, т.е. горение имеет место. Для оценки характера распространения пламени при разных  $\alpha$  были выполнены промеры температуры поперек сечения струи. Замеры показали, что еще при  $\alpha = 0.57$ имеет место распространение фронта пламени в поперечном направлении, а уже при  $\alpha =$ 0.52, т.е. ниже концентрационного предела воспламенения в нормальных условиях, смесь горит только в следе разряда.

Эксперименты были повторены для экстремально бедной топливной смеси с α = 0.11. Вентилятор не использовался. Давление предварительно подготовленной смеси в ресивере задавалось таким, чтобы соответствовать истечению из трубки с числом Маха *М=и/а*=0.3 - 0.9, где *а* - скорость звука. На рис.11 приведены показания термопары для разряда в чистом воздухе (рис.11а) и в топливной смеси с  $\alpha = 0.11$  (рис.11б). Хорошо видно, что при M<0.9 скачок температуры в топливной смеси выше, чем в чистом воздухе. Таким образом, горение имеет место, хотя пламени не видно. Свечение, однако, имеет голубой цвет, а не розовый, как в случае разряда в чистом воздухе.

Для малых и больших скоростей истечения была выполнена оценка полноты сгорания топлива, для чего расчеты по формуле (1) сравнивались с результатами эксперимента.



Рис. 10. Зажигание пропано-воздушной смеси присоединенным к трубчатому инициатору СВЧ разрядом. Скорость потока 11 м/с. Расстояние между кормовым срезом трубки и трубкой с термопарой 30 мм. Справа от фотографии – показания осциллографа с данными термопары. Шкала температуры направлена вниз. Цена деления по времени – 0.1 с, по температуре – 122,5°С.



Рис.11. Показания термопары при зажигании разряда в трубке, через которую прокачивается чистый воздух (а) и экстремально бедная топливная смесь пропана с воздухом с α = 0.11 (б) при различных скоростях истечения (*M=u/a*): 1 - 0.9, 2 - 0.82, 3 - 0.77. 4 - 0.7, 5 - 0.62, 6 - 0.56, 7 - 0.48, 8 -0.41, 9 - 0.35, 10 - 0.3.

Расчет дал  $\Delta T \approx 330^{\circ}$ К. На рис. 12 приведено сравнение экспериментальных значений  $\Delta T$ с расчетным. Видно, что при относительно небольших скоростях (M < 0.5) топливо сгорает полностью. При M > 0.6 топливо полностью сгорать не успевает, т.е. трубку нужно удлинять.



Рис.12. Расчетные и экспериментальные значения скачка температуры при прокачивании бедной смеси (α = 0.11) с различной скоростью.

В окрестности M=0.55 имеет место эффект теплового запирания трубки, при котором число Дамкёлера стремится к своему критическому значение D= 0.335. Пламя гаснет.

Далее были выполнены эксперименты по сравнению скорости распространения пламени при поджигании смеси стримерным разрядом и термическим способом. Опыты проводились с поджиганием смеси в трубке (рис.13) и в латексном шарике (рис.14), заполненными топливной смесью пропана с воздухом. Для инициирования стримерного разряда и в трубке, и в шарике использовался полуволновой линейный вибратор. Термическим способом в шарике смесь поджигалась при помощи автомобильной свечи или газовой зажигалки. Продолжительность воздействия выбиралась таким образом, чтобы количество подведенного тепла к смеси равнялось Q= 40-100 Дж. При меньших значениях Q сопоставимый по вкладу энергии стримерный разряд имел небольшие размеры и его было неудобно наблюдать. В трубке, естественно, свечу и газовую зажигалку было использовать затруднительно, поэтому по разработанной ранее методике [39,40] термическое зажигание имитировалось глубоко подкритическим присоединенным диффузным разрядом. При этом обеспечивались идентичные с зажиганием свечой скорости распространения фронта пламени.

В трубке использование стримерного разряда дает существенно выигрыш в скорости распространения пламени (рис.13). Свой вклад вносит и кумулятивный эффект, т.к. воспламенение происходит в тонком слое на стенке, после чего фронт пламени распространяется к оси и существенно ускоряется. После смыкания фронта на оси происходит выброс языка пламени в сторону открытого края трубки. При этом скорость фронта достигала в отдельных экспериментах 200 м/с. При термическом способе (рис.13б) зажигание носит точечный характер, фронт пламени развивается плавно и постепенно. Его скорость не превышается 1 м/с.

Скорость распространения фронта горения внутри шарика при инициировании СВЧ разрядом составляла от 2 до 5 м/с, что от 2 до 4 раз больше, чем для точечного теплового инициирования горения.



Рис.13. Поджигание топливной смеси в кварцевой трубке стримерным разрядом с подведенной энергией *Q*=24Дж (а) и термическим способом с *Q*=40-100 Дж (б).



Рис.14. Поджигание топливной смеси в свободном пространстве и термическим способом с подведенной энергией *Q*=40-100 Дж (а) и стримерным разрядом с *Q*=24Дж (б). Диаметр надутого топливной смесью шарика на первом фрагменте (а) 150 мм.

Опыты были повторены на установке с маленькой длиной волны  $\lambda = 2.5$  см, как для случая инициирования горения в трубке, так и в шарике. Полученный в опытах разряд - не поверхностно-развитый, присоединенный к поверхности резонатора и представляет собой небольшое плазменное образование с диффузной структурой. Горение, инициированное присоединенным разрядом с  $\lambda = 2.5$ см, оказалось похожим на таковое при искровом зажигании. Пламя диффузионное, скорость распространения фронта пламени примерно 1-2 м/с. Воспламенение носит точечный характер, как и при термическом зажигании, а механизм воспламенения в данном случае - тепловой.

### **IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

При помощи подкритического стримерного разряда, инициированного в квазиоптическом СВЧ пучке полуволновым линейным резонатором, получено устойчивое зажигание особо бедной топливно-воздушной смеси с концентрацией топлива меньше предела воспламенения при нормальных условиях. Подкритический стримерный разряд является резонансным, т.е. каждый отдельный стример является инициатором нового пробоя газа, что приводит к образованию электронной лавины и диссоциации газа наиболее энергетически эффективным способом прямого электронного удара. Воспламенение топливной смеси инициируется в узлах стримерного разряда и носит детонационный характер, т.е. происходит за счет распространения от узлов стримерного разряда ударных волн, поджигающих смесь. Поскольку скорость ударных волн составляет несколько км/с, то смесь воспламеняется почти мгновенно сразу по всему объему, занятому разрядом. Для получения аналогичного характера воспламенения иными видами плазменных разрядов необходимо подвести в 20 - 100 раз большее количество энергии. Для получения описанных эффектов необходимо использовать излучение с длиной волны от 8.9 см до 12.5 см. Излучение с малой длиной волны порядка 2.5 см не способно создавать развитую пространственную структуру разряда, следовательно, бесперспективно лля объемного многоточечного зажигания.

Сгорание отличается более высокой скоростью и полнотой по сравнению с точечным термическим зажиганием. Скорость фронта горения в покоящейся среде, инициированного стримерным разрядом, при прочих равных условиях в 2-4 раза выше в свободном пространстве и до 20 раз выше в трубке, по сравнению с термическим зажиганием, аналогичным по количеству подведенного к топливной смеси тепла. При коэффициенте избытка топлива меньше 0.5 смесь загорается только в области, занятой разрядной плазмой. Зато при прокачивании топливной смеси через область разрядной плазмы следе разряда, горение имеет место даже при очень бедных смесях, с коэффициентом избытка горючего порядка 0.1 и при больших скоростях, достигающих десятков и сотен метров в секунду. Энергетические оценки показывают, что топливо сгорает полностью.

Традиционные малоэмиссионные камеры сгорания имеют большие габариты и весьма сложную конструкцию. Принудительное перемешивание топливной смеси с холодным воздухом и организация многостадийного горения приводят к дополнительным потерям. Это затрудняет применение разработанных для больших турбин методов в микротурбинах. Предложенный в настоящей работе способ сжигания особо бедных смесей благодаря своей экономичности, большой скорости и полноте сгорания может претендовать на использование при создании нового класса компактных малоэмиссионных и высокоэкономичных камер сгорания для микротурбин. Для этого должны быть решены задачи заведения в камеру сгорания СВЧ излучения, а также доказана возможность зажигать разряд вблизи металлических поверхностей. Эти задачи являются предметом дальнейших исследований.

# БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Образования и науки Российской Федерации (соглашение №14.574.21.0151, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57417X0151).

# ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

1. Favorskij O.N. Problemy razrabotki tehnologii malojemissionnogo gorenija i sozdanija malojemissionnyh kamer sgoranija v gazoturbostroenii [Problems of developing low-emissive combustion technology and creating low-emission combustion chambers in gas turbine construction], *Dvigatel' - Engine*, 2012, no 6, pp. 6-9. (In Russian).

2. Grigor'ev A.V., Mitrofanov V.A., Rudakov O.A., Salivon N.D. Teorija kamery sgoranija [Combustion chamber theory], *SPB.: Nauka – st. Petersburg: Science*, 2010, 228 pages. (In Russian).

3. Inozemcev A.A., Sandrackiy V.L. Gazoturbinnye dvigateli [Gas turbine engines], *OAO* "Aviadvigatel'" – JSC "Aircraft engine", 2006, 1202 pages. (In Russian).

4. Zinn B.T., Lieuwen T.C. Combustion Instabilities: Basic Concepts, *Combustion Instabilities In Gas Turbine Engines: Operational Experience, Fun-* damental Mechanisms, and Modeling, Progress in Astronautics and Aeronautics, 2005, pp. 3-26.

5. Lieuwen T.C. Physics Of Premixed Combustion-Acoustic Wave Interactions, *Combustion Instabilities In Gas Turbine Engines: Operational Experience, Fundamental Mechanisms, and Modeling, Progress in Astronautics and Aeronautics,* 2005, pp. 315-366.

6. Lean Combustion Technology and Control. 2nd Edition, Academic Press, 2016, 280 p., ISBN 6 978-0-12-804557-2.

7. Bulat P.V., Bulat M.P., Esakov I.I., Volobuev I.A., Grachev L.P., Denissenko P.V. Environmentally friendly method of gaseous fuel combustion with the use of quasi-optical microwave. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 513– 523. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-2-513-523

8. Kundu K.P., Penko P.F., Yang S.L. Simplified Jet-A/Air Combustion Mechanisms for Calculation of NOx Emissions. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1998, pp. 535-545.

9. Wang T.S. Thermophysics Characterization of Kerosene Combustion. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2001, no 2, pp. 140-147.

10. Khosravyel M. H. Review of the New Combustion Technologies in Modern Gas Turbines, *Progress in Gas Turbine Performance*, 2013, 268 p., ISBN 978-953-51-1166-5. doi: 10.5772/2797

11. Markushin A.N., Baklanov A.V. Osobennosti organizacii processov v ukorochennyh kamerah sgoranija aviacionnogo konvertirovannogo GTD [Features of the organization of processes in the shortened combustion chambers of the aviation converted GTE], *Vestnik dvigatelestroyeniya – Herald of engine building*, 2012, no 2. pp. 170–173. (In Russian).

12. Markushin A.N., Baklanov A.V., Cyganov N.E. Uluchshenie jemissionnyh harakteristik aviaproizvodnogo GTD primeneniem mikrofakel'nogo gorenija v ukorochennoj kamere sgoranija [Improving the emission characteristics of the aircraft GTE by using microfuel combustion in a shortened combustion chamber], *Izvestija vuzov. Aviacionnaja tehnika – Proceedings of high schools. Aviation equipment*, 2013. no 4. pp. 59 – 62. (In Russian).

13. Perna A., Minutillo M., Cicconardi S.P., Jannelli E., Scarfogliero S. Conventional and advanced biomass gasification power plant designed for cogeneration purpose, *Energy Procedia*, 2015, vol. 82, pp. 687-694.

14. Ikeda Y., Nishiyama A., Wachi Y., Kaneko M. Research and development of a microwave plasma combustion engine (Part I: Concept of plasma combustion and plasma generation technique), *SAE Technical Paper*, 2009. 8 p. doi: https://doi.org/10.4271/2009-01-1050.

15. Ikeda Y., Hiroki K., Jeonj M., Kaneko H. Research and development of microwave plasma combustion engine (Part II: Engine performance of plasma combustion engine), *SAE Technical Paper*, 2009. doi: https://doi.org/10.4271/2009-01-1050.

16. Nishiyama A., Ikeda Y. Improvement of Lean Limit and Fuel Consumption Using Microwave Plasma Ignition Technology, *SAE Technical Paper*, 2012. doi: https://doi.org/10.4271/2012-01-1139.

17. Wang J.J., Yang K., Xu Z.L., Fu C. Energy and exergy analyses of an integrated CCHP system with biomass air gasification, *Applied Energy*, 2015, vol 142, pp. 317-327. doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.085 2015;142:317-27.

18. Bak M.S., Do H., Mungal M.G. Cappelli M. A. Plasma-assisted stabilization of laminar premixed methane/air flames around the lean flammability limit, *Combustion and Flame*, vol.50, no 36. 159:3128–3137, 2012.

19. Sasaki K., Shinohara K. Transition from equilibrium to nonequilibrium combustion of premixed burner flame by microwave irradiation, *Phys. D: Appl. Phys.*, 2012, vol. 45., no 45, 455202.

20. Fridman A., Kennedy L. Plasma Physics and Engineering, Second Edition, *Taylor and Francis*, 2011, Boca Raton, 941 p. FL. ISBN 978-1-4398-1228-0.

 Starikovskiy A., Aleksandrov N. Plasmaassisted ignition and combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2013, vol. 39., pp. 331-368.
DeFilippo A., Saxena S., Rapp V.H., Dibble

R.W., Chen J.Y., Nishiyama A., Ikeda, Y. Extending the Lean Stability Limits of Gasoline Using a Microwave-Assisted Spark Plug, *SAE Technical Paper*. doi: 10.4271/2011-01-0663

23. Rapp V.H., DeFilippo A., Saxena S., Chen J.Y., Dibble R.W., Nishiyama A., Moon A., Ikeda Y. Extending Lean Operating Limit and Reducing Emissions of Methane Spark-Ignited Engines Using a Microwave-Assisted Spark Plug. *Journal of Combustion*, Volume 2012, no 5, pp.1-8. Article ID 927081. doi:1 0.1155/2012/927081

24. Tanoue K., Kuboyama T., Moriyoshi Y., Hotta E., Shimizu N., Imanishi Y., Iida K. Extension of Lean and Diluted Combustion Stability Limits by Using Repetitive Pulse Discharges, *SAE Technical Paper*, 2010, 12 p. https://doi.org/10.4271/2010-01-0173.

25. Starikovskaia S.M. Plasma assisted ignition and combustion, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, vol. 39, no 16, pp. 265–299.

26. A. Starikovskiy, N. Aleksandrov. Plasmaassisted ignition and combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*. 39 (2013), 61-110. doi:10.1016/j.pecs.2012.05.003.

27. Y. Ju, W. Sun. Plasma assisted combustion: Dynamics and chemistry. *Progress in Energy and Combustion Science*. 48 (2015), 21-83. http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2014.12.002.

28. Sun W.,Uddi M.,Won S.H., Ombrello T., Carter C., Ju Y. Kinetic effects of non- equilibrium plasma-assisted methane oxidation on diffusion flame extinction limits, *Combustion and Flame*, 2012, vol. 159, pp. 221–229.

29. Starik A.M., Kuleshov P.S., Sharipov A.S., Strelnikova V.A., Titova N.S. On the influence of singlet oxygen molecules on the NOx formation in methane-air laminar flame, *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, vol. 34, Issue 2, pp. 3277–3285.

30. Shibkov V.M., Aleksandrov A.A., Chernikov V.A., Ershov A.P., Shibkova L.V. Microwave and Direct-Current Discharges in High-Speed Flow: Fundamentals and Applications to Ignition, *Journal of Propulsion and Power*, 2009, vol. 25, no. 1, pp. 123-137.

31. Pertl F.A., Smith J.E. Electromagnetic design of a novel microwave internal combustion engine ignition source, the quarter wave coaxial cavity igniter, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2009, pp. 1405-1417.

32. Sun W., Won S.H., Ombrello T., Carter C., Ju Y. Direct ignition and S-curve transition by in situ nano-second pulsed discharge in methane/oxygen/helium counterflow flame, *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, vol. 34, Issue 1, pp. 847-855.

33. 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*,2017. doi:

https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.11.029.

34. Michael J.B., Dogariu A., Shneider M.N., Miles R.B. Subcritical microwave coupling to femtosecond and picosecond laser ionization for localized, multipoint ignition of methane/air mixtures, *Journal of Applied Physics*, 2010, vol. 108, Issue 9, Article Number: 093308 http://dx.doi.org/10.1063/1.3506401

35. Khodataev K.V. Breakdown threshold in the microwave field at low and high pressures in electronegative gas mixtures, *Technical Physics*, 2013, vol. 58, no. 2, pp. 294–297.

36. Aleksandrov K.V., Grachev L.P., Esakov I.I., Fedorov V.V., Khodataev K.V. Domains of existence of various types of microwave discharge in quasi-optical electromagnetic beams. Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics, 2006, vol. 51, no. 11, pp. 1448–1456.

37. Aleksandrov K.V., Esakov I.I., Lavrov P.B., Ravaev A.A., Khodataev K.V. Regular set of gas discharges on the surface of a dielectric in a quasi-optical microwave beam, *Technical Physics*, 2012, vol. 57, no. 8, pp. 1095–1100. doi: 10.1134/S1063784212080026.

38. Alexandrov K.V., Grachev L.P., Esakov I.I. Microwave breakdown of air initiatired by a short electrodynamic vibrator, *Technical Physics*, 2007, vol. 52, no. 12, pp. 1557-1561.

39. Bulat P.V., Esakov I.I., Grachev L.P., Denissenko P.V., Bulat M.P., Volobuev I.A.

40.

charge,

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.

### Сведения об авторах.



Грачев Лев Петрович. Руководитель экспериментальных исследований в НТЦ «Плазменных технологий» АО «МРТИ РАН». Область научных интересов: электрические разряды в газах высокого давления, СВЧ разряды.

E-mail: iesakov@yandex.ru



Acta

Булат Михаил Павлович. Научный сотрудник лаборатории «Газотурбинных энергетических комплексов» БГТУ «BOEHMEX». Кандидат технических наук.

2017.

doi:

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 dis-

https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.11.030.

Astronautica,

Область научных интересов: газотурбинная и авиационная техника.

E-mail: <u>bulat\_mh@mail.ru</u>



Булат Павел Викторович. Научный руководитель лаборатории «Газотурбинных энергетических комплексов» БГТУ «ВОЕН-МЕХ». Доктор физикоматематических наук. Область интересов: газотурбинная техника, авиационная техника E-mail: pavelbulat@mail.ru





Волобуев Игорь Алексеевич. Научный сотрудник международного научного подразделения «Механики и энергетических систем» Университета ИТМО.

Область научных интересов: газотурбинная техника, малоэмиссионные камеры сгорания. E-mail: <u>volobuev\_ig@mail.ru</u>

Упырев Владимир Владимирович. Научный сотрудник лаборатории «Газотурбинных энергетических комплексов» БГТУ «ВОЕНМЕХ».

Область научных интересов: ударные волны, горение, детонация.

E-mail: <u>upyrevvv@yandex.ru</u>



Есаков Игорь Иванович. Доктор физико-математических наук, заместитель генерального директора АО «МРТИ РАН» по научной работе. Область научных интересов: физика плазмы, СВЧ разряды. E-mail: esakov@mrtiran.ru