

03

## Мультиочаговый поджиг газовой горючей смеси подкритическим СВЧ разрядом с развитой стримерной структурой

© К.В. Александров, Н.И. Буслеев, Л.П. Грачев, И.И. Есаков, А.А. Раваев

Акционерное общество „Московский радиотехнический институт РАН“,  
117519 Москва, Россия  
e-mail: grachev@mrtiran.ru

(Поступило в Редакцию 28 апреля 2017 г.)

Описаны экспериментальные исследования возможности использования реализованного в квазиоптическом СВЧ пучке электрического разряда с развитой стримерной структурой для мультиочагового поджига пропан-воздушной горючей смеси. Импульсный СВЧ разряд зажигается на внутренней поверхности заполненной горючей смесью кварцевой трубки, помещенной в СВЧ пучок с подпробойным исходным уровнем поля. Пробой газа инициируется электромагнитным вибратором. В опытах исследован вид разряда в зависимости от уровня СВЧ поля, определен нижний концентрационный предел воспламенения пропан-воздушной смеси разрядом этого вида, и сравнена динамика горения горючей смеси при локальном и мультиочаговом ее поджиге.

DOI: 10.21883/JTF.2018.02.45403.2322

### Введение

В настоящее время рассматриваются различные варианты детонационного режима сжигания топливной смеси. Теоретически показано, что именно такой режим может обеспечить энергетически эффективное ее сгорание [1]. При этом, если скорость фронта обычного дефлаграционного горения, например, пропан-воздушной смеси имеет масштаб одного  $m/s$ , то скорость фронта ее детонационного горения превышает  $1 km/s$ . Такой режим, как правило [2], реализуется в предварительно заполненной горючей смесью трубчатой камере сгорания. При этом один ее конец открыт, а другой закрыт. Поджиг смеси осуществляется около закрытого конца, и для реализации детонационного режима распространения пламени необходимы сравнительно высокие энергетические затраты. Кроме того, в реальных схемах переход от зоны поджига с режимом дефлаграционного горения в детонационный режим пространственно достаточно протяженный. Именно над решением этих проблем и работают сейчас разработчики детонационных двигателей [3].

В настоящее время достаточно подробно изучен газовый электрический разряд в квазиоптическом СВЧ пучке [4]. Причем такой разряд может быть зажжен, например, в воздухе атмосферного давления  $p$  при амплитуде электрической составляющей исходного поля  $E_0$  в несколько  $kV/cm$ . Она существенно меньше минимальной критической величины пробойного поля воздуха атмосферного давления  $E_{cr} \approx 30 kV/cm$ . Пробой воздуха в этом случае инициируется, например, помещением в СВЧ пучок линейного электромагнитного (ЭМ) вибратора. При этом для СВЧ поля, например, с длиной волны  $\lambda \approx 10 cm$  при  $E_0 \geq 1.5 kV/cm$  зажигаемый разряд является динамическим объемным стримерным объектом. Его разрядный фронт распространяется от

ЭМ вибратора — инициатора СВЧ пробоя — навстречу возбуждающей разряд СВЧ волне со скоростью  $v_{fr}$  в несколько  $km/s$ . Отдельные локальные распределенные в пространстве участки этого разряда имеют газовую температуру  $T$  в тысячи градусов.

Целью описываемых в настоящей работе экспериментальных исследований и было определение возможности использования уникальных параметров данного вида разряда по пространственным характеристикам, величин  $v_{fr}$  и  $T$  для реализации мультиочагового поджига газовой пропан-воздушной горючей смеси, т.е. возможности приближения к детонационному режиму ее сгорания.

В ходе выполнения экспериментов были определены количественные параметры используемого в них квазиоптического СВЧ пучка; определены параметры зажигаемого в воздухе при атмосферном  $p$  на внутренней поверхности кварцевой трубки инициированного ЭМ вибратором подкритического СВЧ разряда в зависимости от степени подкритичности поля; определен нижний концентрационный предел воспламенения пропан-воздушной горючей смеси при ее поджиге данным видом разряда; реализован режим дефлаграционного горения заполняющей трубку пропан-воздушной смеси; и режим ее горения при мультиочаговом поджиге.

### Экспериментальные условия

Эксперименты выполнялись на описанной в работе [4] установке с  $\lambda = 8.9 cm$ . Ее схема приведена на рис. 1.

В опытах использовались одиночные СВЧ импульсы длительностью  $\tau_{pul} = 40 \mu s$ . При этом сформированный линейно поляризованный ЭМ пучок характерным диаметром  $60 cm$  излучается в цилиндрическую СВЧ безэховую герметичную рабочую камеру. Вектор  $E_0$  ЭМ

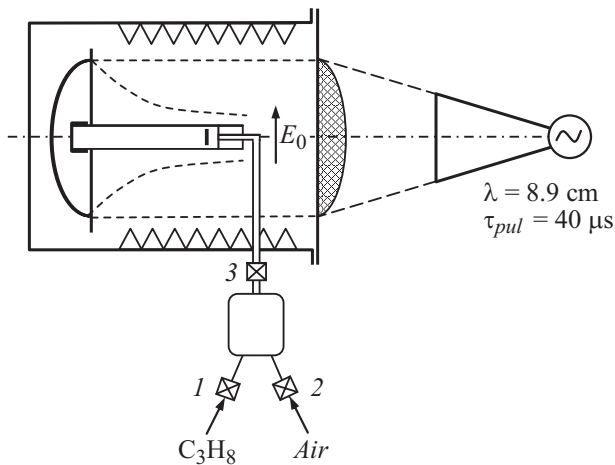


Рис. 1. Схема проведения экспериментов.

пучка вертикален. Пучок падает на сферически вогнутое металлическое зеркало и, отразившись от него, фокусируется. Расстояние фокусной „точки“ от среза зеркала  $x_f = 10.5$  см. В плоскости  $y-z$ , проведенной через область пучка при  $x = x_f$  и перпендикулярной волновому вектору  $\mathbf{k}$  ЭМ пучка, распределение амплитуды поля имеет вид  $E_0 = E_{0\max} e^{-(y/y_0)^2}$  и  $E_0 = E_{0\max} e^{-(z/z_0)^2}$ , где ось  $y$  параллельна вектору  $\mathbf{E}_0$ , ось  $z$  — перпендикулярна ему, а их начало совмещено с осью пучка. В этих зависимостях размер  $y_0 = 5.2$  см, а  $z_0 = 2.5$  см.

В опытах, как показано на рис. 1, в фокусную область ЭМ пучка вдоль его оси может помещаться кварцевая трубка внутренним диаметром  $d = 36$  мм и наружным 40 мм. Дальний от зеркала торец трубки герметизирован диэлектрической пробкой. По оси она имеет отверстие диаметром 1.5 мм. К пробке прикреплена диэлектрическая вспомогательная трубка, по которой к этому отверстию может подводиться заполняющая кварцевую трубку газовая пропан-воздушная смесь. Обращенный к зеркалу торец кварцевой трубки герметизируется полиэтилентерефталатной пленкой толщиной 0.25 мм. Она на длине в 5 мм прикрепляется к наружной поверхности кварцевой трубки вакуумной замазкой. Внутри этой трубки на расстоянии 260 мм от обращенного к зеркалу ее торца к ее цилиндрической боковой поверхности „вдоль“ вектора  $\mathbf{E}_0$  прикреплен ЭМ вибратор. Он выполнен из медного провода диаметром  $2a = 0.35$  мм и длиной  $2l = 45$  мм. Расстояние от инициатора до торцевой поверхности заглушающей трубки пробки равно 24 мм. Из приведенных размеров следует, что заполняемый газовой смесью объем кварцевой трубки  $V_p = 290$  см<sup>3</sup>.

Как показано на рис. 1, система заполнения кварцевой трубки газовой смесью содержит вспомогательный баллон объемом  $V_b = 1.2 \cdot 10^3$  см<sup>3</sup>. Баллон имеет три „клапана“. Через один из них он заполняется пропаном, через второй в эту систему может подаваться воздух из атмосферы, а через третий газовая смесь может по-

даваться в объем кварцевой трубки. Внутренний объем тракта, подводящего газ от вспомогательного баллона к кварцевой трубке,  $V_{ad} = 30$  см<sup>3</sup>.

## Результаты экспериментов

Первоначально экспериментально была определена зависимость величины амплитуды электрической составляющей СВЧ волны  $E_0$  в рабочей области ЭМ пучка вдоль его оси. Эти опыты проводились без кварцевой трубки. В них последовательно на различных расстояниях  $x$ , отсчитываемых от среза зеркала, помещался металлический шарик диаметром 5 мм. Шарик по оси имел отверстие диаметром 1 мм, и подвешивался на пропущенной через это отверстие капроновой нити, перпендикулярной вектору  $\mathbf{E}_0$ . Заполненная атмосферным воздухом рабочая камера установки может откачиваться. В опытах с точностью 3 Торг определялось максимальное давление воздуха  $p_{br}$ , при котором шарик начинал инициировать СВЧ пробой. При этом для обеспечения наличия начальных электронов в приполярных пробойных областях шарика с полем  $E > E_{cr}$  в течение СВЧ импульса он облучался ультрафиолетовым (УФ) излучением. Полученные значения  $p_{br}$  по изложенной в работе [4] методике дали значения  $E_0(x)$ . Соответствующий график помещен на рис. 2.

Амплитуда поля  $E_0$  при  $x = x_f$ , соответствующая  $E_{0\max}$ , при известном поперечном распределении поля позволяет рассчитать используемую в экспериментах мощность СВЧ пучка:

$$P_{\text{beam}}(E_{0\max}^2/2Z_0)(\pi y_0 z_0/2) = 625 \text{ kW},$$

где  $Z_0 = 120\pi\Omega$  — волновое сопротивление свободного пространства.

Из рис. 2 и данных, приведенных в работе [4], следует, что при реализации в этом пучке инициированного СВЧ разряда в воздухе при атмосферном  $p$  в свободном пространстве и на поверхности диэлектрической пластины в исследованном диапазоне  $x$ , т.е. величин  $E_0$ , он будет соответствовать подкритическому и глубоко подкритическому видам СВЧ разряда. Это разряды с

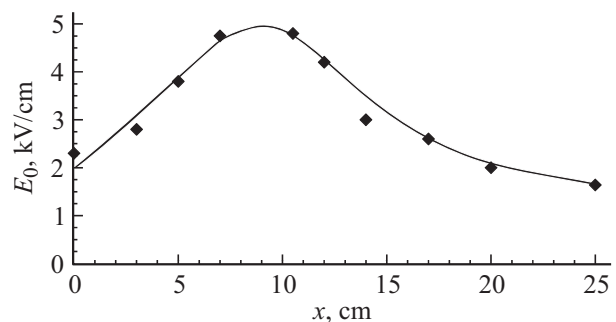
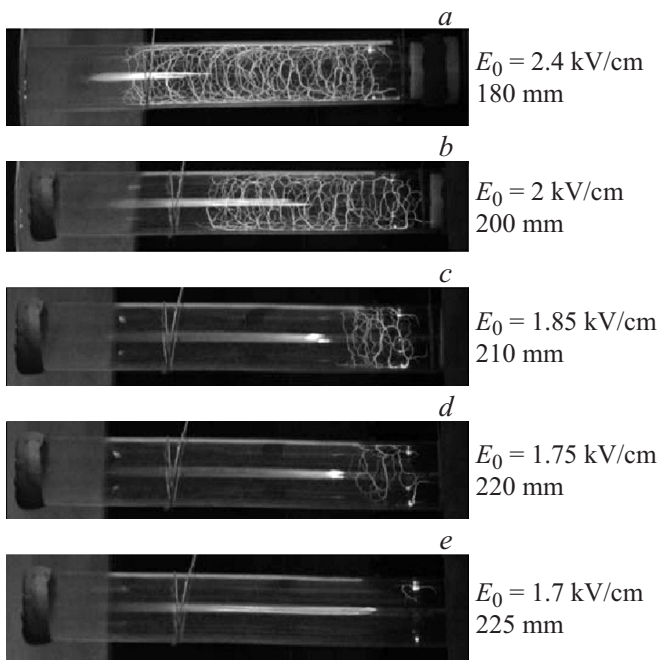


Рис. 2. Зависимость амплитуды электрической составляющей ЭМ волны вдоль оси квазиоптического СВЧ пучка.



**Рис. 3.** Виды инициированного ЭМ вибратором подкритического СВЧ разряда с поверхностью развитой по внутренней поверхности кварцевой трубки стримерной структурой и глубоко подкритического СВЧ разряда, привязанного к концам ЭМ вибратора.

пространственно развитой стримерной структурой и разряды со стримерными каналами, горящими только около концов инициатора. В рамках описываемых исследований был исследован вид этого разряда в зависимости от подкритичности поля при помещении ЭМ вибратора — инициатора СВЧ пробоя воздуха — уже на внутренней поверхности кварцевой трубки.

В этих опытах, как показано на рис. 1, в СВЧ пучок помещалась кварцевая трубка с ЭМ вибратором, и в последовательных СВЧ импульсах трубка смещалась вдоль оси пучка. При этом при каждом расстоянии  $x$  от среза зеркала до ЭМ вибратора производилась фоторегистрация зажигаемого разряда. Соответствующие фотографии приведены на рис. 3. На нем указаны конкретные размеры  $x$  и соответствующие им величины  $E_0$ . Геометрическим масштабom изображений может служить наружный диаметр трубки.

На фотографиях СВЧ излучение распространяется слева направо; вектор  $E_0$  вертикален; с левой стороны находится загерметизированный пленкой торец трубки; с правой — яркие взаимно вертикальные точки являются плазменными образованиями, находящимися у концов ЭМ вибратора; горизонтальная яркая линия вдоль оси трубки является отблеском от элементов освещения помещения. Фотографии констатируют, что реализующийся разряд является плазменным объектом, имеющим стримерную структуру. Его размер вдоль трубки  $L_{dis}$  зависит от величины поля  $E_0$ . На рис. 3,е, соответ-

ствующем  $E_0 \approx 1.7$  kV/cm, стримерные каналы разряда в течение всей длительности СВЧ импульса  $\tau_{pul}$  остаются практически привязанными к концам ЭМ вибратора. Как следует из рис. 3,д и рис. 3,с, они лишь незначительно отходят от них и в диапазоне  $E_0$  от 1.75 до 1.85 kV/cm. Разряд начинает распространяться навстречу СВЧ излучению лишь при  $E_0 \gtrsim 2$  kV/cm. По рис. 3,а, соответствующему  $E_0 \approx 2.4$  kV/cm, можно оценить протяженность разрядной области величиной  $L_{dis} \approx 16$  см. Она дает среднюю по экспериментальным значениям величин  $E_0$  на этом участке ЭМ пучка скорость распространения разрядного фронта  $v_{dis} = 4 \cdot 10^5$  cm/s.

В контрольном эксперименте была проведена фоторегистрация внутренней полости кварцевой трубки при горении в ней СВЧ разряда при расположении вибратора на размере  $x = 18$  см. В этом опыте герметизирующая пленка трубки была снята, и около открытого торцевого конца трубки под углом в  $45^\circ$  к ее оси располагалось плоское зеркало размером  $50 \times 50$  mm. Фотографировалось изображение на зеркале. Оно показало, что разрядные каналы расположены лишь на внутренней поверхности кварцевой трубки, т.е. зажигаемый стримерный СВЧ разряд является поверхностным.

В экспериментах был определен нижний предел зоны воспламенения пропан-воздушной горючей смеси при ее поджиге данным видом разряда.

Эти опыты выполнялись в следующей последовательности. Первоначально все элементы, включающие кварцевую трубку, тракт ее заполнения газовой смесью и вспомогательный баллон, откачивались до давления, меньшего 3 Torr. Затем вспомогательный баллон заполнялся пропаном до заданного давления  $p_{b0}$ , не превышающего 20 Torr, и баллон дозаполнялся воздухом до атмосферного давления  $p_0$ . После этого клапан заполнения кварцевой трубки открывался, и смесь заполняла все элементы. При этом давление газа в них устанавливалось несколько меньшим атмосферного значения, и уже весь тракт дозаполнялся воздухом до атмосферного  $p_0$ . После чего мог включаться СВЧ импульс.

В этих опытах положение кварцевой трубки вдоль оси пучка задавало размер  $x = 11$  см. Как следует из рис. 2 и 3, при этом значении  $x$  будет реализовываться протяженный вдоль трубки СВЧ разряд с развитой стримерной структурой.

Опыты начинались с  $p_{b0} = 9$  Torr. При этом значении  $p_{b0}$  разряд не поджигал газовую смесь. Затем  $p_{b0}$  увеличивалось с шагом в 3 Torr до давления  $p_{b0} = 18$  Torr, и при каждом его значении включался СВЧ импульс. Разряд поджег смесь только при  $p_{b0} = 15$  Torr. После этого процесс повторялся, начиная с  $p_{b0} = 13$  Torr уже с шагом в 1 Torr. При этом при  $p_{b0} = 13$  и 14 Torr разряд не поджигал смесь. Он поджег ее только при  $p_{b0} = 15$  Torr. Расчеты показали, что это граничное значение  $p_{b0}$  задает весовое соотношение пропана и воздуха в кварцевой трубке  $r_{min} = G_{prop}/G_{air} \approx 0.4/16$ , что, естественно, ниже стехиометрического значения

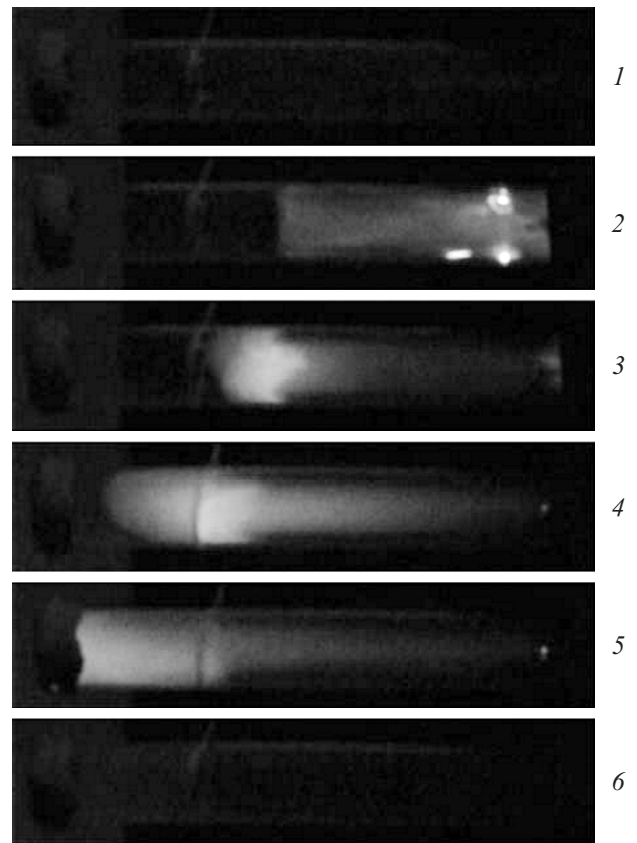
$r_0 = 1/16$ . Полученное значение  $r_{\min}$  практически совпало с известной величиной нижней границы воспламенения пропан-воздушной горючей смеси  $r_{\min} = 0.38/16$  [5].

В следующих опытах исследовался процесс горения этой смеси при ее поджиге только у герметизированного диэлектрической пробкой конца кварцевой трубки. Эти опыты проводились при  $p_{b0} = 18 \text{ Torr}$ , т.е. при  $r = 0.48/16$ , что несколько больше определенной границы  $r_{\min}$ . Первоначально расположение трубки задавало размер  $x = 22.5 \text{ cm}$ . При этом вид разряда соответствует рис. 3, *e*. В этом случае разряд не поджигал смесь. Затем трубка смещалась в сторону фокусирующего зеркала, обеспечив размер  $x = 22 \text{ cm}$ , что соответствует виду разряда, приведенному на рис. 3, *d*. В этом случае разряд уже поджигал смесь.

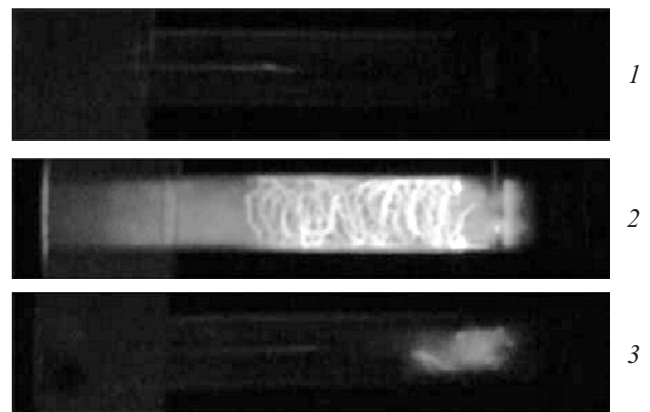
Этот результат экспериментов качественно можно прокомментировать следующим образом. На практике для поджига горючей смеси необходимо не только, чтобы температура газа  $T$  в области ее поджига была больше температуры поджига  $T_{\text{ign}}$ , но и энергия поджига была больше некой минимальной граничной величины [5]. Сравнивая рис. 3, *d* и 3, *e*, можно предположить, что если первое условие выполняется и при  $x = 22.5 \text{ cm}$ , то второе начинает выполняться только при  $x < 22.5 \text{ cm}$ . Количественное подтверждение этого предположения требует дальнейшей проработки. В то же время опытная констатация самого факта поджига горючей смеси показывает, что температура  $T$  отдельных плазменных участков разряда, прилегающего к кварцевой поверхности, больше температуры поджига пропан-воздушной горючей смеси  $T_{\text{ign}} \approx 500^\circ\text{C}$  [2]. Первоначально это было неочевидно. Разработанная к настоящему времени теория и опытные данные этого вида разряда при зажигании его в свободном пространстве дают величину  $T$  масштаба тысячи градусов [4].

На рис. 4 помещена фоторазвертка процесса горения пропан-воздушной газовой смеси при расстоянии от инициатора до среза фокусирующего зеркала  $x = 22 \text{ cm}$ , что соответствует виду разряда, помещенному на рис. 3, *d*. Временная последовательность кадров на рис. 4 — сверху вниз. Время их экспозиции  $\tau_{\text{exp}} = 1/24 \text{ s}$ .

На рис. 4 СВЧ разряд зафиксирован на втором кадре. На нем с правой стороны две яркие точки являются плазменными образованиями у концов ЭМ вибратора. Учитывая, что длительность СВЧ импульса  $\tau_{\text{pul}} = 40 \mu\text{s}$ , разряд горит только в течение  $\tau_{\text{exp}}$  этого кадра. Физика продольного неяркого светящегося образования на этом кадре общей длиной  $\sim 160 \text{ mm}$  в настоящее время неясна. Можно предположить, что она связана с УФ излучением, исходящим из плазменных разрядных областей [6]. Правый конец этого образования определяется торцем диэлектрической заглушки кварцевой трубки. Как было указано, расстояние от инициатора до этого торца равно  $24 \text{ mm}$ . Этот размер может служить масштабом изображений. Левый протяженный, направленный навстречу СВЧ излучению участок светящегося обра-



**Рис. 4.** Временная последовательность обычного дефлаграционного распространения пламени по заполненной пропан-воздушной горючей смесью кварцевой трубке при „точечном“ поджиге этой смеси глубоко подкритическим СВЧ разрядом.

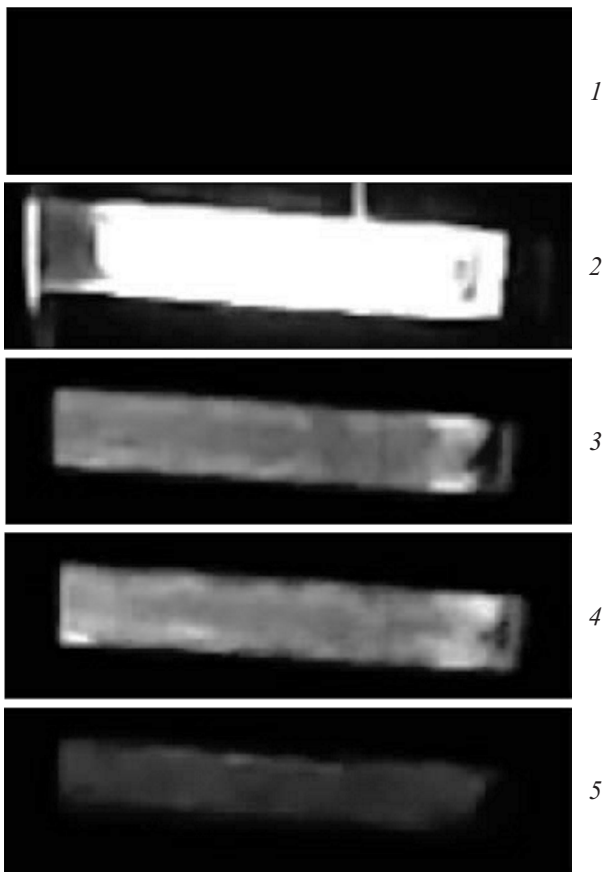


**Рис. 5.** Видеосъемка горения заполняющей кварцевую трубку пропан-воздушной горючей смеси при ее продольном мультиочаговом поджиге подкритическим СВЧ разрядом с поверхностно развитой стримерной структурой.

зования заканчивается резкой вертикальной границей. Физика этой ее формы также неясна.

На кадре 3 четко просматривается яркий передний фронт процесса распространения пламени, который уже





**Рис. 6.** Скоростная видеосъемка процесса горения заполняющей кварцевую трубку пропан-воздушной горючей смеси при ее продольном мультиочаговом поджиге подкритическим СВЧ разрядом с поверхностно развитой стримерной структурой.

в несколько видоизмененной форме зафиксирован и на кадре 4. По кадрам 3 и 4 расстояние между передними кромками этого фронта можно оценить величиной  $\Delta x = 67 \text{ mm}$ . С учетом величины  $\tau_{\text{exp}}$  этот размер дает скорость распространения фронта горения  $v_{\text{fr}} \approx 1.6 \text{ m/s}$ . Эта величина является типичной для значений  $v_{\text{fr}}$  при его дефлаграционном распространении в трубе [2].

Из рис. 4 следует, что к кадру 6, т.е. за время  $\tau_{\text{comb}} \approx 0.16 \text{ s}$ , процесс сгорания пропана практически заканчивается.

На рис. 5 помещена фоторазвертка процесса сгорания пропан-воздушной горючей смеси при расстоянии от инициирующего СВЧ пробой газа инициатора до среза фокусирующего зеркала  $x = 18 \text{ cm}$ , что соответствует виду разряда, зафиксированному на рис. 3, а. На рис. 5 по-прежнему  $\tau_{\text{exp}} = 1/24 \text{ s}$ . Из него следует, что разряд осуществил мультиочаговый поджиг горючей смеси практически одновременно по всей длине разрядной области. При этом весь процесс горения смеси не превышает времени  $\tau_{\text{exp}}$ . На кадре 3 небольшая светящаяся область около правого конца кварцевой

трубки регистрирует остаточный процесс догорания смеси, поступающей из тракта заполнения ею кварцевой трубки.

На рис. 6 приведена фоторазвертка этого же варианта поджига горючей смеси, но уже с  $\tau_{\text{exp}} = 1/1200 \text{ s}$ .

Кадр 2 этой подборки также констатирует, что разряд осуществляет мультиочаговый поджиг горючей смеси. Процесс ее сгорания иллюстрируют последующие кадры. Из них следует, что при поджиге пропан-воздушной горючей смеси таким видом разряда ее сгорание происходит за время  $\tau_{\text{comb}} \approx 3.3 \text{ ms}$ . Это время более чем на порядок меньше определенного ранее в эксперименте времени сгорания этой смеси при ее точечном поджиге и дефлаграционном распространении пламени по смеси.

Следует также отметить, что если при дефлаграционном горении смеси герметизирующая кварцевую трубку торцевая полиэтиленфторофталаатная пленка лишь слегка отходит от поверхности трубки, что, естественно, приводит к разгерметизации трубки, то при мультиочаговом поджиге горючей смеси эта пленка мгновенно „выбивается“. Связано ли это только с более быстрым сгоранием пропана в смеси или с полнотой его сгорания в настоящее время неясно и требует дальнейших количественных измерений.

## Заключение

Экспериментально реализован импульсный электрический разряд в воздухе атмосферного давления в квазиоптическом СВЧ пучке на внутренней поверхности помещенной вдоль оси пучка кварцевой трубки. Определен диапазон уровня поля, в котором разряд из глубоко подкритического вида с привязанными в течение всего СВЧ импульса к концам инициатора стримерными каналами переходит в подкритический вид, в котором стримерные каналы, распространяясь навстречу ЭМ излучению, образуют поверхностно развитую систему. Экспериментально показано, что нижний концентрационный предел воспламенения пропан-воздушной горючей смеси разрядом этого вида практически совпадает с пределом ее воспламенения при поджиге электрическим разрядом „традиционного“ вида. В опытах реализованы „точечный“ поджиг пропан-воздушной смеси и обычный дефлаграционный процесс распространения фронта ее горения. Реализован и режим практически мгновенного мультиочагового поджига горючей смеси вдоль оси кварцевой трубки. При этом время сгорания горючего в смеси сокращается более чем на порядок. Вопрос увеличения эффективности его сгорания требует дальнейшего изучения.

Выполненные исследования дают основания для анализа возможности практического применения данного вида СВЧ разряда, например, в газотурбинных двигателях.

## Список литературы

- [1] Зельдович Я.Б. // ЖТФ. 1940. № 1 (17). С. 1453–1461.
- [2] Бартльме Ф. Газодинамика горения. М.: Энергоиздат, 1981. 279 с.
- [3] Булат П.В., Ильина Е.Е. // Фундаментальные исследования. 2013. № 10, Ч. 10. С. 2140–2142.
- [4] Грачев Л.П., Есаков И.И., Александров К.В., Раваев А.А., Северинов Л.Г., Ходатаев К.В. Газовый электрический разряд в квазиоптическом СВЧ пучке. М.: АО „МРТИ РАН“, 2015. 187 с.
- [5] Сэйтиро Кумагаи. Горение: Пер. с японского. М.: Химия, 1979. 256 с.
- [6] Богатов Н.А., Голубев С.В., Зорин В.Г. // Физика плазмы. 1986. Т. 12. Вып. 11. С. 1369–1375.