УДК 629.7

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СТРИМЕРНОГО ПОДКРИТИЧЕСКОГО СВЧ-РАЗРЯДА В ДЕТОНАЦИОННОМ ДВИГАТЕЛЕ

ABOUT USAGE POSSIBILITY OF UNDERCRITICAL STRAMER SHF DISCHARGE IN DETONATION ENGINE

Волобуев Игорь Алексеевич
Университет ИТМО
volobuev_ig@mail.ru

Аннотация. В работе рассматривается проблема эффективного инициирования детонации в приложении к задаче создания детонационного двигателя. Исследовано объемное инициирование детонации стримерным подкритическим СВЧ разрядом. Изучалась начальная стадия развития процесса – задолго до перехода медленного горения в детонацию. Выполнено сравнение со случаем, когда топливная смесь поджигается обычной электрической искрой. Показано, что использование стримерного разряда приводит к существенному увеличению скорости процесса, появлению множества очагов зарождения детонационных волн, а также полному сгоранию топливной смеси. Известно, что для прямого инициирования детонации необходимо подвести большую энергию в как можно более тонкий слой, примыкающий к твердой стенке, т.е. организовать поверхностный взрыв. В работе исследован подрыв топливной смеси стримерным разрядом, присоединенным к плоской и вогнутой поверхности различной формы. Для создания стримерных разрядов применялся полуволновой электромагнитный вибратор, который за счет резонанса уменьшал энергию поля, необходимую для электрического пробоя газа примерно в 500–600 раз.

Ключевые слова: газовая динамика, квазиоптическое СВЧ излучение, детонация, инициирование детонации, переход горения в детонацию.

Volobuev Igor Alekseevich
ITMO University
volobuev_ig@mail.ru

Annotation. The problem of efficient detonation combustion initiation in application to detonation engines is considered. Volumetric detonation initiated by undercritical SHF streamer discharge is researched. Article focuses on the first stage of process development – one before transition of deflagration into detonation combustion. Comparison with the case of spark fuel combustion initiation is conducted. Usage of streamer discharge shows considerable increase in process speed, appearance of spots of detonation wave generation, and total fuel combustion. Applying high amounts of energy in thinnest layer possible near the wall is necessary to initialize detonation combustion directly, i.e. to organize surface explosion. In this work, explosion of fuel by streamer discharge connected to a plane and concave surface different forms. Creation of streamer discharge was conducted by half-wave electromagnet vibrator, that reduces field energy necessary for electric puncture by means of resonance in 500–600 times.

Keywords: fluid dynamics, quasioptical SHF radiation, detonation, initiation of detonation combustion, deflagration – detonation transition.

В работе исследуется возможность применения в детонационных двигателях стримерных разрядов для инициирования детонации. Детонационные двигатели теоретически на 20–25 % превосходят традиционные реактивные двигатели, использующие термодинамический цикл Брайтона горения при постоянном давлении [1]. Преимущество достигается за счет того, что топливо сгорает на детонационной волне [2] в чрезвычайно тонком слое, что позволяет её считать газодинамическим разрывом нулевой протяженности [3]. Газодинамические разрывы могут образовывать ударно-волновые структуры, взаимодействовать между собой, испытывать перестройки и трансформации [4]. Поскольку детонационная волна – это обычная ударная волна, т.е. обычный газодинамический разрыв, то все, сказанное выше, касается и детонационных волн. Единственное отличие заключается в способе их образования и механизме распространения в среде. Он, как правило, имеет химическую природу.

Детонационная волна может возникнуть в результате перехода из стадии медленного горения за счет турбулизации фронта пламени. Фронт теряет устойчивость по одному из известных механизмов, появляются языки пламени, распространяющихся перед фронтом горения с большими локальными скоростями (рис. 1). Между этими языками возникают, так называемые, «горячие точки» (hot spot), в которых резко воз-

растает давление и температура (рис. 2). Эти точки являются источником локальных ударных волн, которые начинают распространяться вверх по потоку с существенно сверхзвуковой скоростью, взаимодействуют друг с другом и формируют через некоторое время единую детонационную волну, которая поджигает горючую смесь и за счет этого распространяется дальше по потоку.

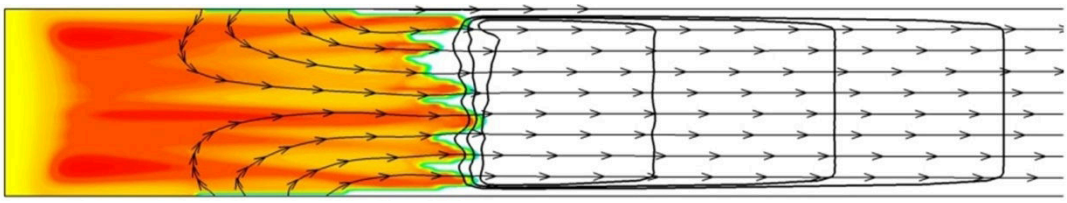


Рисунок 1 – Потеря устойчивости фронта горения, его ускорение с образованием высокоскоростных языков пламени

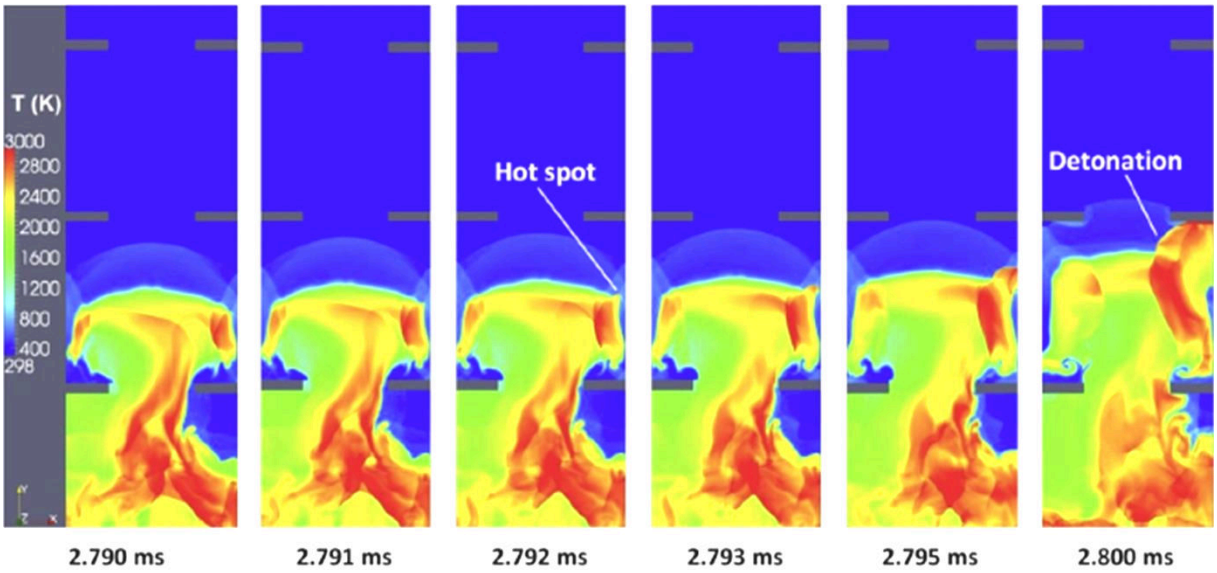


Рисунок 2 – Образование на турбулентном фронте горения «горячих точек» (Hot spot), в которых зарождаются детонационные волны (Detonation) [5]

Эффективность перехода от горения к детонации зависит, главным образом, от интенсивной турбулизации фронта горения, для чего обычно используют различные ухищрения, помещая в поле распространения фронта горения препятствия в виде перегородки, спирали Щелкина и т.п. Преимущество создания детонации путем перехода от медленного горения состоит в низких первоначальных затратах энергии. Недостаток – существенный путь и время развития процесса от горения до детонации. Не отличаются стабильностью и параметры – дистанция перехода от горения к детонации может изменяться от случая к случаю.

Другим способом является непосредственное инициирование детонации сильным взрывом. Для этого в сопоставимых условиях необходимы затраты энергии примерно в 1000 раз больше, чем при переходе в детонацию от медленного горения. Существует критический уровень энергии детонации, который зависит от многих факторов: формы области, куда подводится энергия, времени разряда, формы взрыва, соотношения горючего и окислителя и т.п. Весьма полный обзор проблемы приведен, например, в статье [6]. Однако, можно сделать некоторое обобщение, что энергию лучше всего подводить в максимально тонкий слой на плоской или вогнутой поверхности. Для этого пробовали использовать мощные лазеры и коронные разряды, но низкий КПД таких систем делает эти методы мало привлекательными.

Сотрудниками Московского Радиотехнического Института Российской Академии Наук (МРТИ РАН) был разработан и исследован способ инициирования в газе стри-

мерного СВЧ-разряда (рис. 3) в квазиоптическом электромагнитном поле, энергия которого намного меньше энергии электрического пробоя газа (так называемые, глубоко подкритические разряды). В настоящей работе исследуется возможность ускорения перехода от горения к детонации при использовании для инициирования такого рода разрядов, а также возможность организации подрыва смеси при помощи разряда, зажженного на криволинейной поверхности.

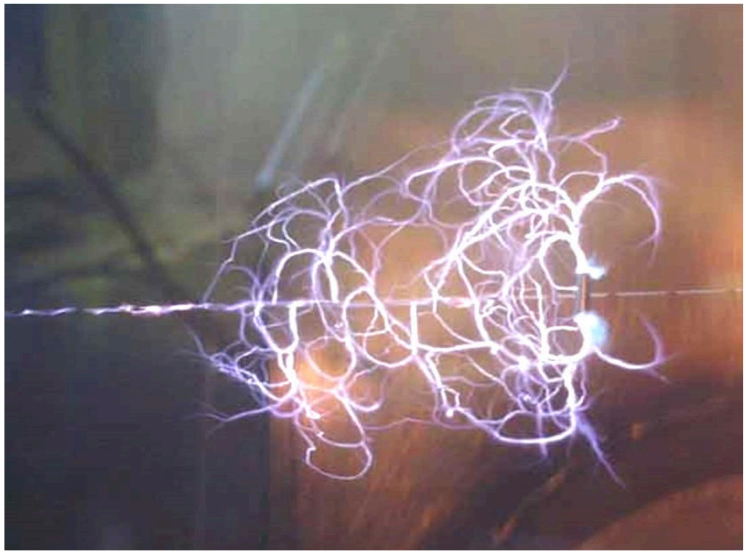


Рисунок 3 – Стримерный разряд

На первом этапе изучалась возможность создания условий для ускоренного перехода горения в детонацию. Для этого в фокус установки, схема которой изображена на рисунке 4 помещался инициатор разряда (инициатор пробоя воздуха), представлявший собой полуволновой электромагнитный вибратор. Он позволяет реализовать СВЧ разряд при атмосферном давлении воздуха.

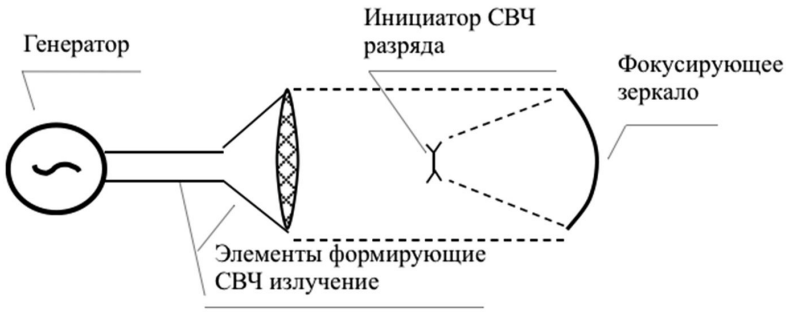


Рисунок 4 – Схема экспериментальной установки для инициирования стримерного разряда

В установку входит СВЧ генератор, генерирующий электромагнитные колебания с частотой $f \approx 3 \cdot 10^9$ Гц, или длинной волны $\lambda = 8{,}9$ см, при длительности СВЧ импульса $\tau_{имп} = 40$ мкс. Электромагнитные колебания распространяются по элементам, формирующим линейно поляризующий квазиоптический СВЧ пучок поперечным диаметром 60 см. Излучение поступает на фокусирующее зеркало. В области фокуса поперечный размер СВЧ пучка примерно равен 10 см и имеет характерную протяженность около 15 см. В элементы формирующие СВЧ излучение включен аттенюатор, который позволяет менять мощность СВЧ пучка $P_{пучка}$ в диапазоне от 10^2 Вт до $\approx 10^6$ Вт. Непосредственно к инициатору прикреплен резиновый шарик диаметром около 10 см, наполненный смесью пропана и воздуха. При подаче импульса длительностью около 40 мкс к инициатору подводится энергия около 1 Дж (максимальная располагаемая мощность

импульса – порядка 1 МВт). При этом внутри шарика пробегает стримерный разряд, поджигающий смесь (рис. 5). В результате, шарик лопается.

Для сравнения был проведен эталонный эксперимент по инициированию горения при помощи стандартного искрового зажигания с подведенной энергией также 1 Дж. Развитие процесса воспламенения смеси записывалось на скоростную камеру со скоростью 1,200 кадров/с. На рисунке 6 видно, что от очага воспламенения (область оранжевого цвета) распространяется классический диффузионный фронт горения, скорость которого порядка 1.5 м/с. «Горячие точки» не образуются и предпосылок для детонации нет. Область горения – голубого цвета, характерного для диффузионного горения пропана.

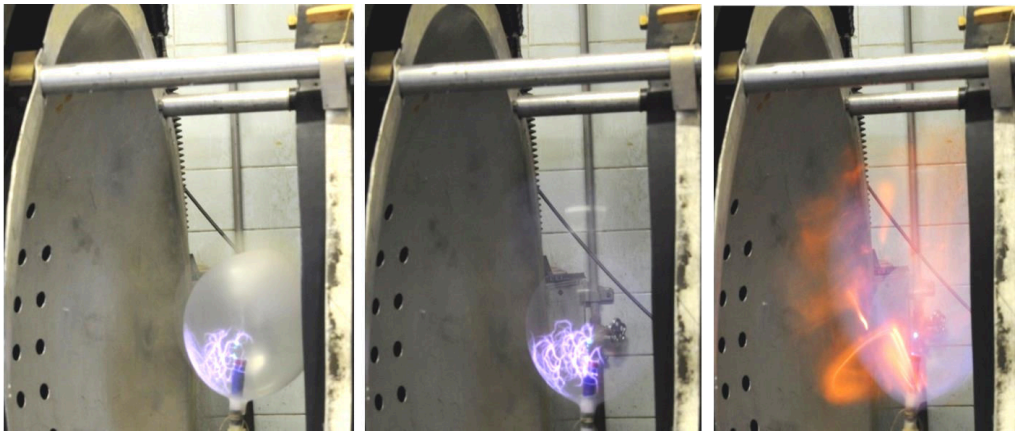


Рисунок 5 – Поджигание шарика, наполненного пропаном, стримерным разрядом

В момент, когда шарик лопнул, произошел мощный выброс турбулентного пламени оранжевого цвета, что свидетельствует о неполностью сгоревшем пропане (см. последний кадр на рис. 6).

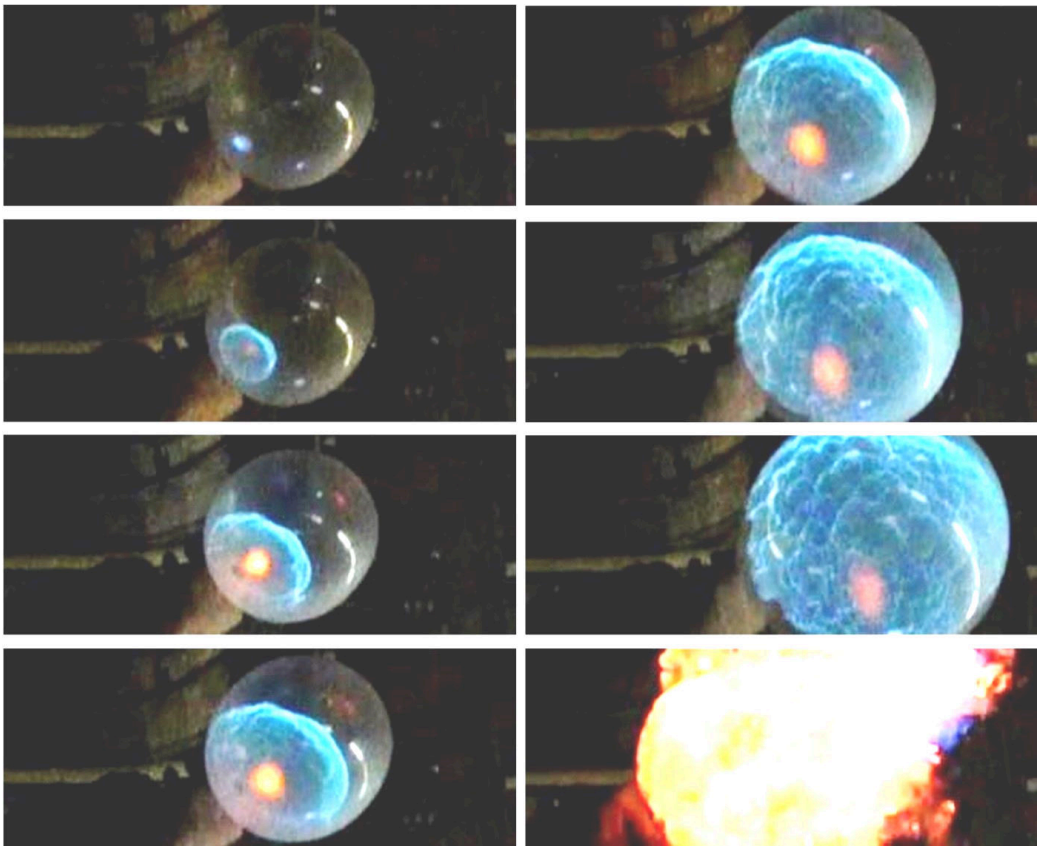


Рисунок 6 – Поджиг шарика с пропаном искровым зажиганием (1200 кадров/с)

Совершенно иначе развивается процесс при стримерном инициировании горения. Процесс развивается примерно в четыре раза быстрее. Фронт горения имеет сложную форму (рис. 7). В результате самопересечений фронта образуются мощные волны сжатия (ярко голубые линии на рис. 7), а также множество «горячих точек», которые являются предпосылками для инициирования детонационной волны. Скорость распространения фронта горения составляет на разных участках от 4 до 15 м/с. В момент, когда шарик лопается, выброс пламени отсутствует, что свидетельствует о практически полном выгорании пропана к этому моменту (см. последний кадр на рис. 7). Таким образом, примерно в четыре раза увеличивается не только скорость распространения фронта пламени, но и полнота сгорания топлива, что может быть использовано при разработке малоэмиссионных камер сгорания.

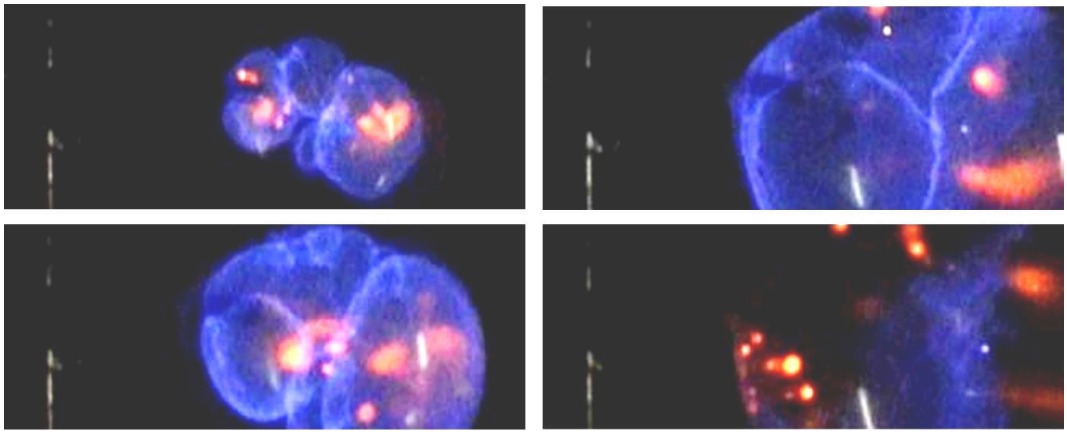


Рисунок 7 – Поджиг шарика с пропаном стримерным разрядом (1200 кадров/с)

Особенно перспективным выглядит образование множество «горячих точек» – центров образования будущих детонационных волн. Для детального исследования данного процесса был выполнен эксперимент (рис. 8), в ходе которого съемка велась уже со скоростью 69.000 кадров/с. На первом кадре видна вспышка стримерного разряда. Скорости камеры не хватает, чтобы увидеть структуру разряда, поэтому в дальнейшем был проведен еще один эксперимент, когда видео фиксировалось со скоростью 500.000 кадров/с. Он позволил определить тот факт, что горение начинает развиваться уже после того, как разряд погас.

Начиная со второго кадра, на рисунке 8 видно, как развивается область горения. Уже в начальный момент времени она отличается сильной турбулентностью, фронт пламени имеет сложную форму, состоящую из множества языков пламени. В узлах фронта в большом количестве образуются «горячие точки». Их количество сначала быстро растет, а потом остается примерно постоянным до момента, когда шарик лопается. От «горячих точек» распространяются сильные волны сжатия, которые образуют новые узлы фронта пламени и новые «горячие точки».

Таким образом, можно сделать вывод, что стримерный разряд, благодаря своей развитой пространственной структуре (рис. 5) сразу формирует форму фронта пламени, наиболее благоприятную для перехода горения в детонацию. Появление множество «горячих точек» и жесткое ультрафиолетовое излучение значительно (в разы) увеличивает скорость горения и полноту сгорания топлива.

Представляется целесообразным использовать стримерное инициирование детонации вместо искрового в импульсно-детонационном двигателе. Другим перспективным направлением исследований является изучение ускорения медленного горения в поле СВЧ разряда, а также уменьшение выбросов окислов азота в результате уменьшения времени пребывания продуктов сгорания в области высоких температур.

Исследовалось возможность инициирования детонации поверхностным разрядом. Для этого использовалась та же установка (рис. 3), но в фокус помещалась диэлектрические поверхности разной формы (рис. 9), на которые крепился инициатор разряда.

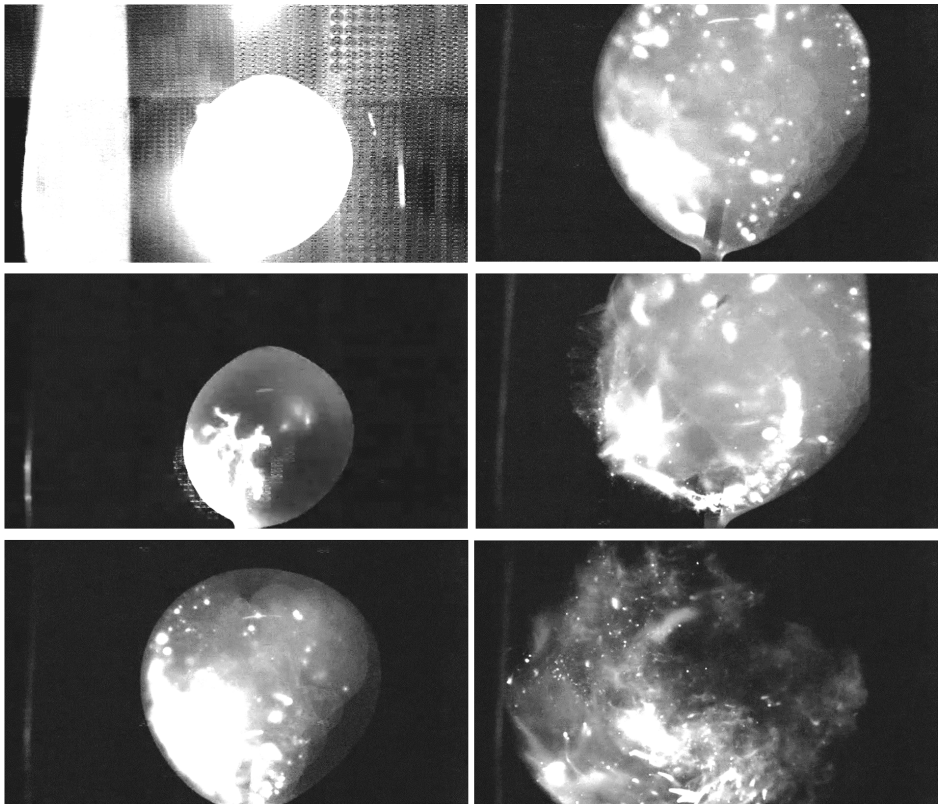


Рисунок 8 – Поджиг шарика с пропаном стримерным разрядом (69000 кадров/с)

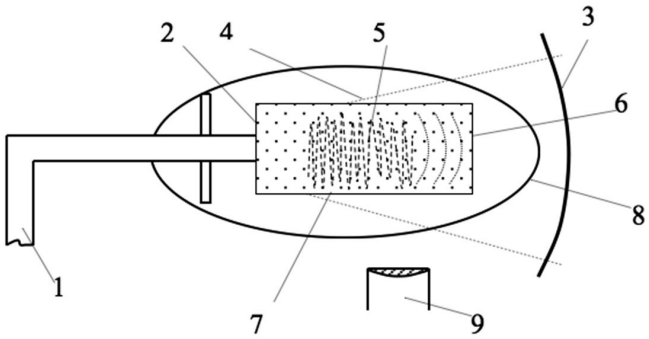
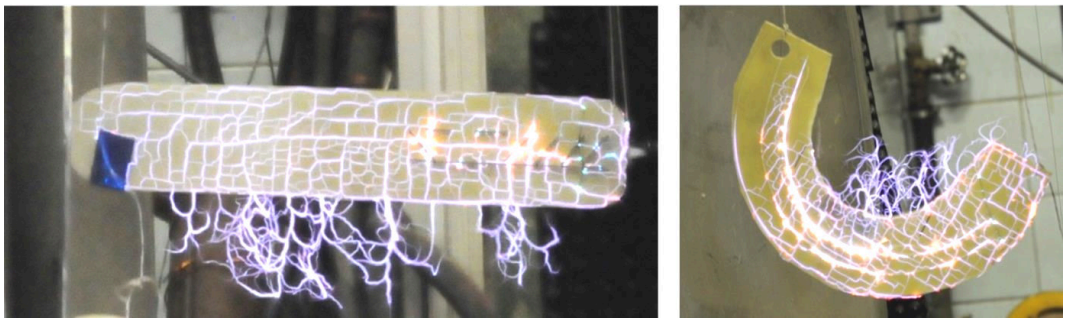


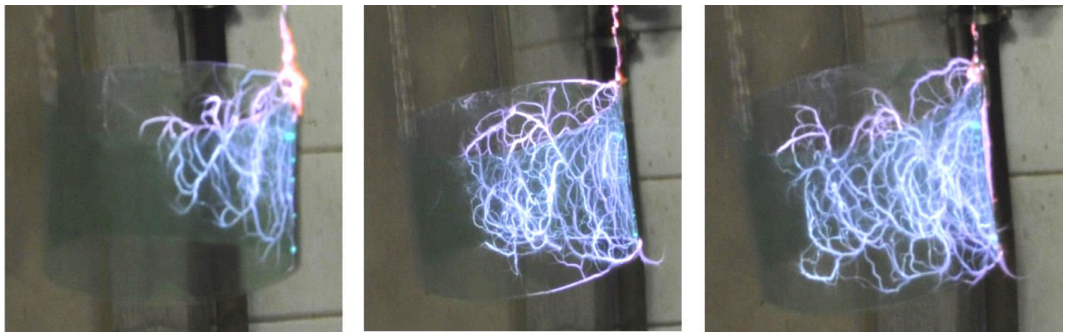
Рисунок 9 – Схема установки рабочей модели для исследования присоединенного стримерного разряда:
1 – Подача пропан-воздушной горючей смеси; 2 – Инициатор СВЧ разряда; 3 – Фокусирующее зеркало; 4 – СВЧ пучок; 5 – СВЧ разряд; 6 – Фронт пламени; 7 – Стеклотекстолитовая пластина; 8 – Тонкая радиопрозрачная оболочка; 9 – Фоторегистратор

Эксперименты показали, что стримерный разряд бежит навстречу полю со скоростью 10–15 км/с, повторяя форму поверхности. Разряд можно зажечь как на поверхности прямолинейного плоского куска диэлектрика, так и на торце цилиндрической поверхности и на внутренней поверхности цилиндра (рис. 10). Нанесение на поверхности неровности (царапина, углубление) приводит к формированию вдоль этого дефекта шнурового разряда.

Хотя разряд развивается поступательно по направлению от инициатора к источнику излучения, скорость его распространения настолько велика, что поджигание горючей смеси происходит сразу на всей поверхности, по которой пробегал разряд (рис. 11). Именно это и требуется для инициирования фронта детонации. На покадровой развертке видно, что от плоской пластины параллельно оси симметрии распространяются в разные стороны практически прямолинейные фронты горения. Если по краям пластины поместить стенки, то возникнет кумулятивный эффект и образуется детонационная волна.



а)



б)

Рисунок 10 – Инициирование присоединенного стримерного СВЧ разряда на плоской (а) и вогнутой (б) поверхности

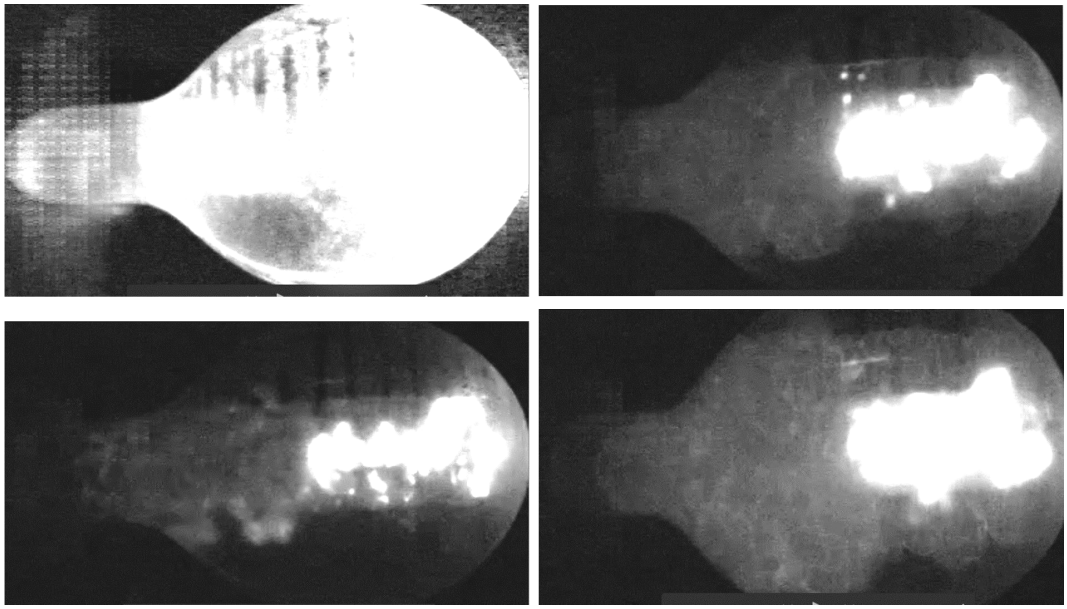


Рисунок 11 – Цилиндрический взрыв, инициированный стримерным разрядом, присоединенным к плоской пластине (см. рис. 10, а)

Таким образом, по итогам проведенных исследований можно сделать вывод, что применение инициирования горючей смести при помощи стримерного СВЧ разряда вместо искрового или лазерного способа зажигания является перспективным как для ускорения перехода от медленного горения к детонации, так и для прямого инициирования детонационной волны. Существенно ускоряется горение, что может быть использовано для уменьшения размеров камер сгорания, сокращения выбросов в атмосферу окислов азота, повышения термодинамического КПД.

Исследования необходимо продолжить с целью приближения условий проведения эксперимента к реальным параметров реактивных двигателей.

Литература:

1. Булат П.В. Тенденции разработки детонационных двигателей для высокоскоростных воздушно-космических летательных аппаратов и проблема тройных конфигураций ударных волн. Часть I – Исследования детонационных двигателей / П.В. Булат, П.В. Денисенко, К.Н. Волков // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2016. – Т. 16. – № 1. – С. 1–21.

2. Bulat P.V., Uskov V.N. Shock and detonation wave in terms of view of the theory of interaction gasdynamic discontinuities / P.V. Bulat, V.N. Uskov // Life Science Journal. – 2014. – 11, 8s. – 307–10 P. – URL : www.lifesciencesite.com/lsj/life1108s/068_ 24921life1108s14_307_310.pdf

3. Bulat P.V. Gas-dynamic discontinuity conception / P.V. Bulat, V.N. Uskov, L.P. Arkhipova // Research Journal of Applied Sciences. – 2014. – 8, 22. – 2255–59 P. – URL : www.maxwellsci.com/print/rjaset/v8-2255-2259.pdf

4. Bulat P.V. Classification of gas-dynamic discontinuities and their interference problems / P.V. Bulat, V.N. Uskov, L.P. Arkhipova // Research Journal of Applied Sciences. – 2014. – 8, 22. – 2248–54 P. – URL : http://maxwellsci.com/print/rjaset/v8-2248-2254.pdf

5. Emami S. et. al. // IJHE. – 2015.

6. А.А. Брисов. Инициирование детонации в газовых и двухфазных смесях / В книге «Импульсные детонационные двигатели» / Под ред. С.М. Фролова. – М. : Торус Пресс, 2006. – С. 159–186.

7. I. Esakov, L. Grachev, K. Khodataev, V. Vinogradov and D. Van Wie, «Deeply Subcritical MW Discharge in the Submerged Stream of Propane-Air Mixture», Proc. 46rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 7–10 Jan. 2008. – AIAA 2008–1403.

8. D.V. Bychkov, I.I. Esakov, L.P. Grachev, K.V. Khodataev, D.M. Van Wie, «Electrical discharge in deeply subcritical field of MW beam in a high-speed air stream and in propane-air mixture», Proc. 47rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Orlando, USA, 7–10 Jan. 2009. – AIAAPaper 2009–1551.

References:

1. Bulat P.V. Tendencies of development of detonation engines for high-speed aerospace aircraft and a problem the troinykh of a configuration shock waves. Part I – Researches of detonation engines / P.V. Bulat, P.V. Denisenko, K.N. Volkov // Scientific-tecnical messenger information technologies, mechanics and optics. – 2016. – V. 16. – № 1. – P. 1–21.

2. Bulat P.V., Uskov V.N. Shock and detonation wave in terms of view of the theory of interaction gasdynamic discontinuities / P.V. Bulat, V.N. Uskov // Life Science Journal. – 2014. – 11, 8s. – 307–10 P. – URL : www.lifesciencesite.com/lsj/life1108s/068_ 24921life1108s14_307_310.pdf

3. Bulat P.V. Gas-dynamic discontinuity conception / P.V. Bulat, V.N. Uskov, L.P. Arkhipova // Research Journal of Applied Sciences. – 2014. – 8, 22. – 2255–59 P. – URL : www.maxwellsci.com/print/rjaset/v8-2255-2259.pdf

4. Bulat P.V. Classification of gas-dynamic discontinuities and their interference problems / P.V. Bulat, V.N. Uskov, L.P. Arkhipova // Research Journal of Applied Sciences. – 2014. – 8, 22. – 2248–54 P. – URL : http://maxwellsci.com/print/rjaset/v8-2248-2254.pdf

5. Emami S. et. al. // IJHE. – 2015.

6. A.A. Brisov. Initiation of a detonation in gas and two-phase mixes / In the book Pulse detonation engines / Under the editorship of S.M. Frolov. – M. : Torus Press, 2006. – P. 159–186.

7. I. Esakov, L. Grachev, K. Khodataev, V. Vinogradov and D. Van Wie, «Deeply Subcritical MW Discharge in the Submerged Stream of Propane-Air Mixture», Proc. 46rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 7–10 Jan. 2008. – AIAA 2008–1403.

8. D.V. Bychkov, I.I. Esakov, L.P. Grachev, K.V. Khodataev, D.M. Van Wie, «Electrical discharge in deeply subcritical field of MW beam in a high-speed air stream and in propane-air mixture», Proc. 47rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Orlando, USA, 7–10 Jan. 2009. – AIAAPaper 2009–1551.