

03.1

Сравнение энергетической эффективности воспламенения топливной смеси искровым и стримерным разрядами

© П.В. Булат¹, К.Н. Волков^{2,¶}, Л.П. Грачев³, И.И. Есаков³, П.Б. Лавров³, Н.В. Продан¹, П.С. Чернышов¹¹ Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия² Университет Кингстона, Лондон, Великобритания³ Московский радиотехнический институт РАН, Москва, Россия

¶ E-mail: dsci@mail.ru

Поступило в Редакцию 5 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 5 апреля 2021 г.

Принято к публикации 8 мая 2021 г.

На основе данных физического и вычислительного экспериментов обсуждается повышение топливной экономичности и эффективности процессов горения в энергетических установках. Рассматриваются две системы воспламенения топливной смеси, в одной из которых используется многоточечный импульсный искровой разряд, а в другой — многоточечный стримерный разряд. Проводится сравнительная оценка энергетической эффективности каждого из подходов к поджиганию топливной смеси, делаются выводы об их эффективности и перспективах использования.

Ключевые слова: искровой разряд, стримерный разряд, СВЧ-разряд, плазменное горение, двигатель.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.15.51236.18804

Использование нескольких источников зажигания, распределенных по длине камеры сгорания (многоточечное зажигание), увеличивает суммарную поверхность пламени, обеспечивая надежность воспламенения, повышение скорости горения в объеме камеры и полноту сгорания горючей смеси [1,2]. Многоточечное воспламенение топливной смеси также в существенной степени сокращает время перехода от дефлаграции к детонации (deflagration to detonation transition). В двигателях различной конструкции находят применение различные типы плазменного горения, такие как горение в среде коронного разряда или наносекундного разряда, лазерный способ создания плазменного очага горения [3,4].

Проведенные теоретические, экспериментальные и численные исследования свидетельствуют о многообещающих характеристиках и широких перспективах практического применения подкритического стримерного разряда [5–9].

В настоящей работе изучается воспламенение в цилиндре постоянного объема предварительно перемешанной топливной смеси пропана с воздухом при помощи многоточечного искрового зажигания и многоточечного зажигания стримерными СВЧ-разрядами. Преимуществом зажигания стримерным разрядом по сравнению с другими является увеличение скорости сгорания топлива при постоянном объеме от 20–30% до нескольких раз при существенном уменьшении затрат энергии на воспламенение смеси.

Для проведения экспериментальных исследований используется стенд, спроектированный и разработанный в МРТИ РАН, который позволяет исследовать воспламенение горючих смесей с помощью классической системы зажигания, используя автомобильные свечи за-

жигания, и новой системы зажигания на основе подкритических стримерных разрядов. Измерения проводятся на установке с длиной волны микроволнового излучения $\lambda = 12.3$ см при мощности квазиоптического пучка $P = 1$ kW и длительности СВЧ-импульсов $\tau = 0.2$ s. Детали экспериментальной установки приводятся в работах [6,7].

В рабочей камере сгорания устанавливается восемь инициаторов с шагом 40 mm. Инициаторы крепятся на кварцевой трубке диаметром 10 mm с помощью высокотемпературного циакринового клея. Кварцевая трубка устанавливается в центре камеры по оси трубы при помощи специальных подставок, изготовленных из радиопрозрачного теплозащитного материала с диэлектрической проницаемостью, близкой к единице. Установка позволяет поджигать топливную смесь одной, четырьмя или восемью искровыми автомобильными свечами либо восемью стримерными СВЧ-разрядами. Инициаторы СВЧ-разрядов изготавливаются из проволоки Ni–Cr диаметром 0.5 mm. Установка имеет два смотровых окна (боковое и торцевое), через которые производится видеосъемка процесса воспламенения на скоростную камеру Nicon D1 со скоростью 400 fps. Благодаря этим видеозаписям можно оценить скорость распространения фронта пламени и время горения пламени.

Для проверки и выявления влияния разных физических факторов на результаты выполняется вычислительный эксперимент. В расчетах исследуется развитие пламени при зажигании смеси одной, четырьмя и восемью искровыми свечами, а также одним и восемью СВЧ-разрядами. Продолжительность СВЧ-разряда предполагается равной $6 \mu\text{s}$, а подведенная к плазме энергия — 1.6 J. При расчете искрового зажигания используется

стандартная модель искры с продолжительностью разряда 4 ms и количеством выделяемой одной свечой энергии 0.5 J. Мощность выделения энергии изменяется по линейному закону: от максимальной в начальный момент времени до 0.5 от максимальной в момент времени 4 ms.

Для численного моделирования формирования и распространения стримерного разряда в поле электромагнитного импульса СВЧ-излучения, а также последующего поджигания плазменными каналами топливной смеси и ее горения применяются нестационарные трехмерные уравнения Навье–Стокса, уравнения Максвелла и уравнения химической кинетики для термодинамически неравновесной плазмы. Используется модель поглощения СВЧ-излучения стримерным разрядом, в результате чего происходит его разогрев. Для расчета химической кинетики горения смеси пропана с воздухом привлекается квазиглобальная модель горения, которая включает элементарные реакции между 12 компонентами смеси и одну глобальную реакцию [9]. Некоторые детали математической модели приводятся в [8]. Форма разряда полагается сферической с равномерным покрытием по объему сеткой стримеров. Энергия, подводимая к разряду, выделяется на стримерах. Для упрощения считается, что основная энергия выделяется в узлах стримера в сферических образованиях, диаметр которых составляет примерно 3 диаметра стримера.

Общая энергия для питания системы свечей находится с учетом следующих данных: источник питания $V_p = 14.5$ kV, КПД источника питания $\eta_p = 50\%$, сопротивление провода $R_w = 5$ k Ω (используются силиконовые провода ВА3 2101-06), ограничивающее сопротивление $R_b = 10$ k Ω (обеспечивают одновременное зажигание нескольких свечей от общего источника питания). Общее сопротивление в цепи каждой свечи $R_t = R_w + R_b = 15$ k Ω . Ток в цепи $I_{\max} = V_p/R_t = 0.98$ A (максимальное значение), а величина измеренного тока составляет 0.9 A. Полная емкость накопителя $C_t = 1.85$ μ F. Энергия, которая запасается в емкости и выделяется во всех восьми свечах, $W = C_t V_p^2/2 = 208$ J. Тогда $W_t = W/\eta_p = 416$ J.

Найдем энергию, выделившуюся на одной свече. Напряжение в дуге свечи $V_1 = 300$ V (измеряется). В цепь устанавливается восемь свечей, соединенных параллельно. Ток, который течет во всех цепях питания свечей, $I_{\max} = V_p/R_{\Sigma} = 7.7$ A, где $R_{\Sigma} = R_t/8 = 1.87$ k Ω . Постоянная времени процесса разряда $\tau = C_t R_{\Sigma} = 3.46$ ms. Время работы также измеряется осциллографом с помощью резистивного датчика, что дает $t_s = 2.4\tau = 5$ ms. Ток имеет экспоненциальную форму во времени, уменьшаясь от максимального значения I_{\max} до нуля за время 2.4τ .

Энергия, которая выделяется в разряде во всех восьми свечах, считается как площадь треугольника со сторонами I_{\max} и 2.4τ , поскольку ток не постоянный, а падает от I_{\max} до нуля. Оценка дает $W_s = P_s t_s = V_1 I_{\max} 2.4\tau/2 = 6.4$ J. КПД системы

$\eta_s = W_s/W_p = 1.5\%$. При использовании одной свечи накопительная емкость уменьшается в 8 раз. Время работы свечи не изменяется и составляет $t_s = 8.5$ ms.

Рассмотрим оценку эффективности поджига смеси с помощью системы СВЧ-разрядов. КПД всей системы зависит от КПД модулятора, КПД магнетрона, КПД поглощения энергии инициаторами. Напряжение на магнетроне $U_m = 30$ kV (измеряется встроенным в блок питания вольтметром), а ток, идущий через магнетрон, составляет $I_m = 40$ A (измеряется шунтом и осциллографом). Мощность, которая тратится на питание магнетрона, $P_m = U_m I_m = 1200$ kW. Время работы магнетрона (время излучения СВЧ-энергии или время существования разряда) $t_m = 6$ μ s (это значение максимально для данного генератора СВЧ-излучения). Энергия, необходимая для питания магнетрона, $W_m = P_m t_m = 7.2$ J.

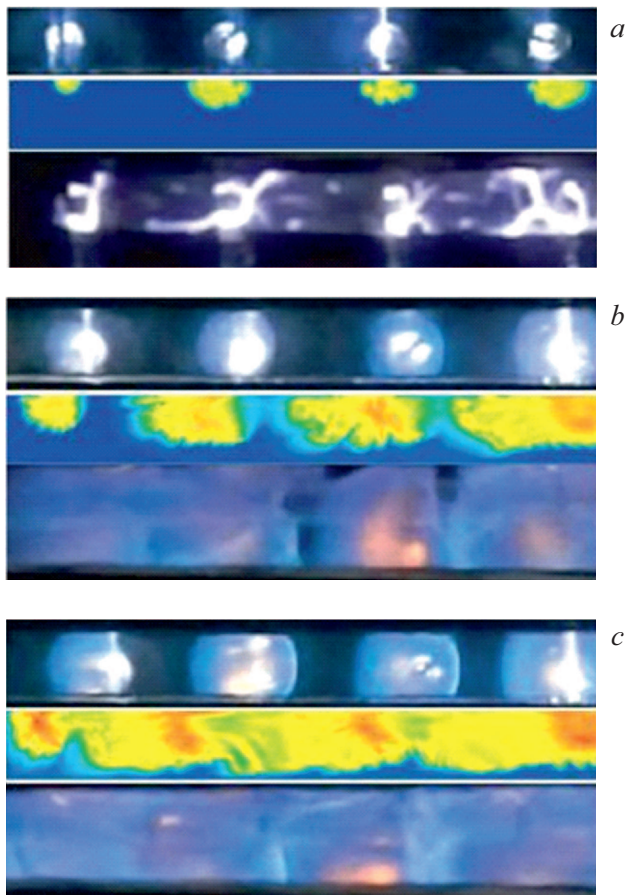
Модулятор имеет КПД меньше 80%, а с учетом накала, охлаждения, системы запуска КПД составляет $\eta_m = 50\%$. Энергия, подводимая ко всему источнику СВЧ-излучения, $W_{\Sigma} = W_m/\eta_m = 14.4$ J.

Подсчитаем энергию, которая выделяется в СВЧ-плазме. Мощность СВЧ $P_s = 600$ kW. Измеренный коэффициент отражения СВЧ-излучения от рупора составляет 12 dB; следовательно, КПД системы магнетрон–труба $\eta_{mt} = 94\%$. До системы инициаторов доходит мощность СВЧ-излучения $P_{mi} = P_s \eta_{mt} = 550$ kW. Инициаторы и сама камера не полностью оптимизированы по конструкции, поэтому можно сделать вывод, что энергия, которая выделяется в разрядах, составляет 50% от общей подведенной энергии: $\eta_{ts} = 50\%$.

Найдем энергию, которая выделяется в плазме, созданной восемью инициаторами (данная плазма поджигает пропановоздушную смесь): $W_s = P_{mi} t_m \eta_{ts} = 1.6$ J. КПД СВЧ-системы составляет $\eta_s = W_s/W_{\Sigma} = 14.4$ J или 11%. Данный КПД можно поднять до 20%, если выполнить оптимизацию системы труба–инициаторы–волновод.

Сравнение результатов расчета с экспериментом представлено на рисунке. На каждом фрагменте сверху показано развитие горения при искровом зажигании, в середине — результаты моделирования горения при стримерном зажигании, внизу — результаты эксперимента при стримерном зажигании. Результаты расчетов и экспериментов в части скорости развития горения при стримерном зажигании довольно хорошо согласуются между собой.

Расчеты показывают, что выделяемая на стримерах энергия приводит к образованию ударных волн большой интенсивности, которые довольно быстро затухают, так как начальный диаметр плазменного образования имеет порядок 1 mm. Нагрев ударными волнами и термодиффузия приводят к постепенному нагреву топливной смеси до температуры около 1000 K. В этот момент происходит вспышка, в которой средняя температура составляет уже 2000 K. По области воспламенения пробегают детонационные волны, которые поджигают смесь



Сравнение результатов экспериментов с искровым поджигом смеси (верхняя часть каждого фрагмента) с результатами моделирования стримерного зажигания (средняя часть) и эксперимента со стримерным зажиганием (нижняя часть) в случае восьми центров зажигания (показана половина трубы) в моменты времени, соответствующие возникновению разряда (a), 3/400 s (b), 6/400 s (c).

Энергетическая эффективность двух систем поджига пропановоздушной горючей смеси

| Параметр | Зажигание искровым разрядом | Зажигание стримерным разрядом |
|----------|-----------------------------|-------------------------------|
| W , J | 6.4 | 1.6 |
| КПД, % | 1.5 | 11 |
| P , J | 416 | 14.4 |

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

Сравним энергетическую эффективность и особенности двух систем поджига пропановоздушной горючей смеси (см. таблицу). В первой строке таблицы приведено сравнение энергий, которые затрачиваются на воспламенение пропановоздушной смеси. Энергия, которая выделяется в свечном разряде, в 4 раза больше,

чем энергия, выделяемая в СВЧ-разряде. Следующая строка показывает сравнение КПД обеих систем поджига. КПД системы СВЧ-поджига в 8 раз больше, чем КПД системы поджига свечей зажигания. В последней строке представлено сравнение количества энергии из сети. В случае СВЧ-поджига необходимо почти в 30 раз меньше энергии.

По всем показателям КПД и энергозатрат система мультиточагового СВЧ-поджига превосходит традиционную систему искрового разряда. Кроме того, скорость нарастания давления больше в случае использования мультисистемы СВЧ-разрядов, хотя это увеличение не является столь существенным (составляет около 10%).

На основе проведенных экспериментальных и численных исследований показано, что подкритический разряд, инициированный внутри модельной камеры сгорания, позволяет осуществить поджиг как бедных, так и богатых топливных смесей. При этом эффективность поджига топливной смеси стримерным разрядом оказывается выше, чем для точечного и многоточечного зажигания смеси импульсным искровым разрядом. При этом скорость увеличения давления при многоточечном стримерном зажигании на треть выше, чем при многоточечном искровом разряде, и в 3 раза выше, чем при стандартном воспламенении с помощью одной свечи, а затраты подводимой энергии почти в 30 раз меньше.

Применение стримерного зажигания топливной смеси позволяет существенно поднять удельные показатели как двигателей внутреннего сгорания, так и двигателей постоянного объема. Система зажигания топливной смеси с помощью подкритического стримерного разряда представляется перспективной для двигателей, в которых используется горение при постоянном объеме, в скоростном до- и сверхзвуковом потоке топливной смеси, а также для пульсационных и ротационных детонационных двигателей.

Финансирование работы

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Y. Ju, W. Sun, *Prog. Energy Combust. Sci.*, **48**, 21 (2015).
DOI: 10.1016/j.pecs.2014.12.002
- [2] J. Koch, J.N. Kutz, *Phys. Fluids*, **32**, 126102 (2020).
DOI: 10.1063/5.0023972
- [3] A. Starikovskiy, N. Aleksandrov, *Prog. Energy Combust. Sci.*, **39**, 331 (2013). DOI: 10.1016/j.pecs.2012.05.003
- [4] A.I. Saifutdinov, E.V. Kustova, A.G. Karpenko, V.A. Lashkov, *Plasma Phys. Rep.*, **45**, 602 (2019).
DOI: 10.1134/S1063780X19050106
- [5] K.V. Khodataev, in *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* (Reno, Nevada, 2005), AIAA 2005-598.
DOI: 10.2514/6.2005-598
- [6] П.В. Булат, Л.П. Грачев, И.И. Есаков, А.А. Раваев, Л.Г. Северинов, *ЖТФ*, **89** (7), 1016 (2019).
DOI: 10.21883/JTF.2019.07.47790.409-18
- [7] P.V. Denissenko, M.P. Bulat, I.I. Esakov, L.P. Grachev, K.N. Volkov, I.A. Volobuev, V.V. Upyrev, P.V. Bulat, *Combust. Flame*, **202**, 417 (2019).
DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.01.029d
- [8] M.P. Bulat, P.V. Bulat, P.V. Denissenko, I.I. Esakov, L.P. Grachev, K.N. Volkov, I.A. Volobuev, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **47**, 62 (2019). DOI: 10.1109/TPS.2018.2853179
- [9] V.R. Katta, W.M. Roquemore, in *34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. and Exhibit* (Cleveland, 1998), AIAA 1998-3766.
DOI: 10.2514/6.1998-3766