

## 22. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ, АКУСТИЧЕСКИЕ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

А.Л. Куранов, В.В. Кучинский, А.Б. Никитенко, \*В.С. Сухомлинов, \*Т.Л. Ткаченко  
*Научно-исследовательское предприятие гиперзвуковых систем ХК «Ленинец», Санкт-Петербург*

*\*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

Процессы горения в камере сгорания как дозвуковых, так и сверхзвуковых реактивных двигателей нуждаются в оптимизации. Более того, фундаментальная проблема, стоящая перед разработчиками сверхзвукового прямоточного двигателя сгорания – ускорение воспламенения смеси до сверхзвуковой скорости. В обычных топливно – воздушных смесях волны горения связаны с прогревом газа, поэтому их распространение определяется процессами переноса тепла, которые даже при наличии сильной турбулентности не могут дать необходимой скорости распространения волны. Идея использования плазменных методов воспламенения топлива основана на неравновесной генерации химически активных частиц, ускоряющих процесс горения. Предполагается, что выигрыш в энергии, затрачиваемой на ускорение горения, в плазменных методах достигается за счёт неравновесной природы плазмы в разряде, позволяющей произвести концентрацию радикалов, превосходящую ее равновесное значение. Величина эффекта, очевидно, в значительной степени зависит от начальной температуры, давления и состава смеси.

Выбирая тип плазменного разряда, применение которого наиболее выгодно для оптимизации процесса горения в камере сгорания, необходимо проанализировать существующие типы подобных разрядов, эффективность, энергетические затраты на генерацию и сложность технической реализации.

Затем следует определить условия функционирования экспериментального стенда, проанализировав методологию оценки влияния плазменных образований на процессы горения в камере сгорания. При этом необходимо определить параметры рабочей среды в камере сгорания,

измеряемые экспериментально, и выбрать (или разработать при их отсутствии) методы и аппаратуру для измерения.

#### ***4.1 Выбор типа разряда для оптимизации процессов горения***

Существование плазменных образований в тракте двигателя (до камеры сгорания, или непосредственно в ней) приводит к трем основным эффектам: а) увеличение начальной температуры топливной смеси, б) образование химически активных частиц, состав которых зависит от вида топлива и в) увеличение завихренности течения и лучшее перемешивание топлива и окислителя. Последний эффект характерен для униполярного неравновесного разряда в магнитном поле [1]. Для корректного выбора типа разряда необходимо проанализировать, какой из эффектов оказывает наибольшее влияние на процессы горения. Очевидно, что первые два фактора оказывают влияние на скорость и время инициации горения. Действительно, увеличение начальной температуры значительно сокращает время инициации горения за счет меньшей необходимой для этого энергии, рост количества химически активных частиц приводит к увеличению скорости реакций, протекающих при горении топлива. В многочисленных работах по плазменной инициации горения [1–7], показано, что оба механизма оказывают существенное влияние на ускорение, как процесса горения, так и инициации в зависимости от условий горения. Так, в работе [2] утверждается, что основное влияние на процессы горения оказывает наработка химически активных частиц в разряде (см. рис. 4.1, [2]). В работе же [3] – напротив, что главная причина ускорения процесса горения – тепловой нагрев топливной смеси плазмой (см. рис. 4.2, [3]). Как отмечалось в главе 1, для исследований в данной области обычно применяются следующие типы плазменных разрядов: продольные и поперечные квазистационарные униполярные самостоятельные разряды [4], наносекундные импульсные разряды [5], различные типы СВЧ – разрядов [6]

и др. Основной механизм влияния наносекундных импульсных разрядов на сокращение времени инициации и ускорение процесса горения – наработка большого числа активных в химическом отношении радикалов [5]. Это связано с тем, что указанный тип разряда является существенно неравновесным, в котором основная энергия электрического поля идет на нагрев и образование электронов, обеспечивающих эффективное электронно-колебательное возбуждение молекул горючей смеси. Напротив, главный эффект использования СВЧ разряда – эффективное вложение энергии в газ в области плазмы, то есть – нагрев газа.

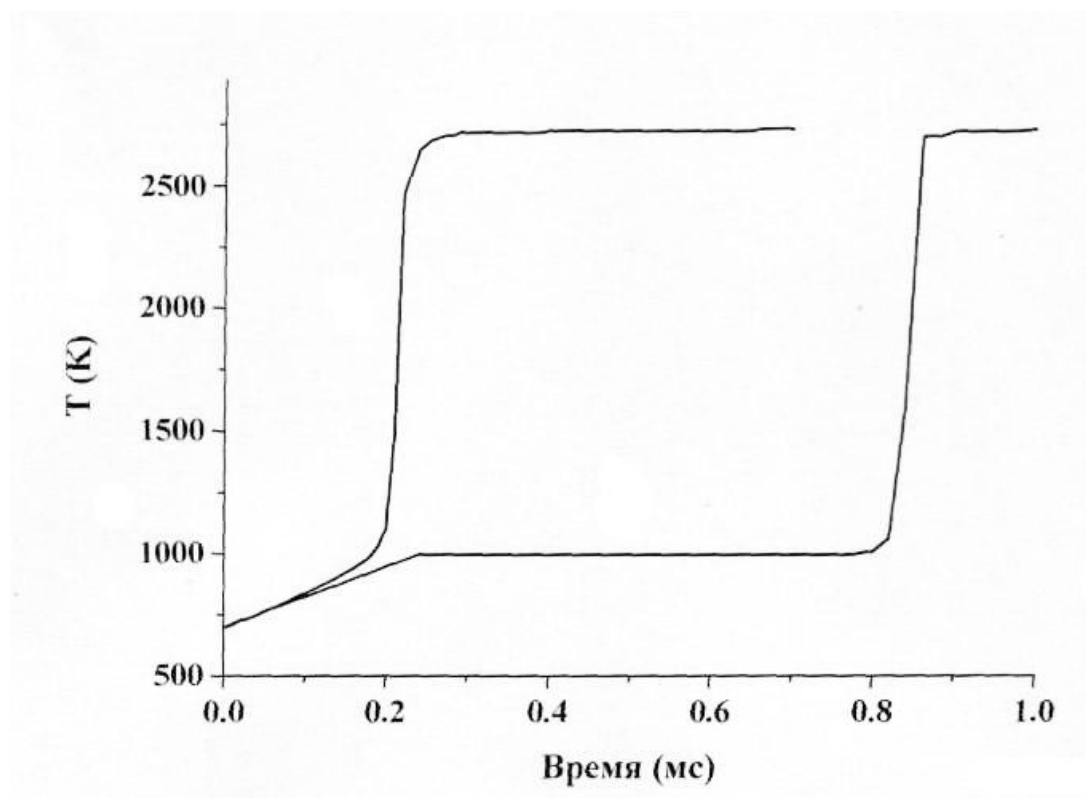


Рис. 4.1 — Зависимость температуры газа от времени.  $P = 1 \text{ атм}$ ,  $T_0 = 700 \text{ К}$ , длительность разряда  $0.24 \text{ мс}$ , смесь  $\text{H}_2 : \text{O}_2 : \text{N}_2 = 0.28 : 0.14 : 0.58$ . Левая линия – возбуждение разрядом; правая линия – нагрев

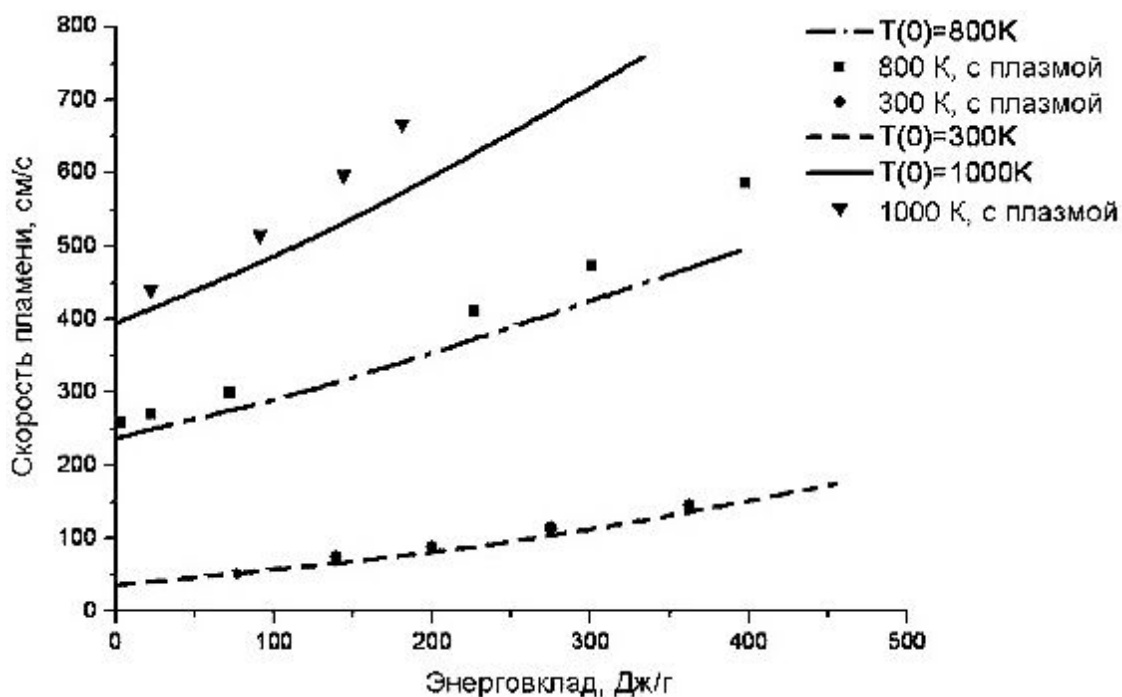


Рис. 4.2 — Зависимость скорости пламени от энерговклада при различных начальных температурах (300K, 800K, 1000K) с влиянием плазмы и без нее

Как известно, самостоятельный униполярный разряд является неравновесным при малых и средних давлениях, однако, при повышении давления от сотен Торр до атмосферного степень его неравновесности заметно падает [7]. Таким образом, при использовании подобного типа разряда появляется возможность исследовать влияние на процесс горения обоих вышеназванных факторов. Кроме того, ценным является возможность произвольной ориентации вектора электрического поля в плазме подобного разряда относительно массовой скорости реагирующих компонентов в камере сгорания. Именно поэтому, на наш взгляд, при исследовании влияния плазмы на процессы горения следует использовать данный тип разряда.

Основным недостатком униполярного квазистационарного разряда в данном случае является низкий коэффициент преобразования потребляемой энергии генераторов такого разряда, а также низкая стабильность параметров создаваемой плазмы. Эти задачи были успешно решены (см. ниже.).

## ***4.2 Выбор параметров экспериментальной установки***

Для исследования влияния плазменных образований на процессы горения экспериментальная установка должна соответствовать ряду требований:

1) необходима установка непрерывного действия, поскольку уменьшение времени непрерывной работы стенда приводит к усложнению диагностической аппаратуры и алгоритмов обработки экспериментальных данных;

2) должна быть предусмотрена непрерывная откачка и отвод в безопасное место продуктов горения;

3) необходимо иметь возможность изменять параметры горючей смеси в камере сгорания в широких пределах;

4) необходимо иметь возможность дистанционного прецизионного перемещения датчиков по объему камеры сгорания во время процесса горения топлива с пультом управления вне камеры сгорания;

5) необходимо обеспечивать ввод электрических соединений снаружи в камеру сгорания, при этом, ряд из этих электрических соединений должны быть высоковольтными (напряжение до 10 кВ).

6) необходима камера сгорания, помещенная в герметичную камеру большего размера, достаточную для размещения диагностической аппаратуры и снабженную функцией откачки продуктов сгорания (см. п. 2).

Установка, отвечающая вышеперечисленным требованиям – это аэродинамическая труба ВУ-1, на которой до настоящего времени проводились эксперименты, в том числе, и по плазменному аэродинамическому обтеканию.

## ***4.3 Краткая характеристика установки ВУ-1***

ВУ-1 является сверхзвуковой аэродинамической трубой, первоначально предназначенной для моделирования обтекания тел при их входе в плотные слои атмосферы Земли и других планет.

Основные параметры потока:

- числа Маха потока  $M = 0.8 \div 7$ ;
- моделируемый диапазон высот  $15 \div 100 \text{ км}$ ;
- максимальное число Кнудсена  $Kn = 1.5$ ;
- диапазон чисел Рейнольдса  $Re_0 = 10 \div 10^3$ ;
- температура торможения потока  $T_0 = 1300^\circ \text{C}$  (омический подогрев газа);
- (плазменный подогрев газа  $T_0 = 2500^\circ \text{C}$ ;
- температурный фактор  $0.1 \div 1$ ;
- рабочий газ воздух,  $N_2$ ,  $CO_2$ , пропан;
- максимальная нерасчетность струйных течений  $n \sim 10^3$ ;
- максимальная электрическая мощность  $65 \text{ кВт}$ .

Схема установки ВУ-1 приведена на рис. 4.3. Установка ВУ-1 была одной из первых в стране аэродинамических труб, позволяющей моделировать условия полета на высотах  $15 \div 100 \text{ км}$ . Особенности проведения исследований на ВУ-1:

7) Установка оснащена аппаратурой "электронно-пучкового" метода, позволяющей вести изучение полей плотности при обтекании острых и затупленных тел. Эта методика позволяет определять эволюцию параметров в поле течения при различной степени разреженности, изучать релаксационные процессы в газе при различных температурах, а также структуры струй с горением.

8) Для изучения горения в сверхзвуковых потоках на ВУ-1 разработан специальный стенд, отличительная особенность которого заключается в использовании специального дозатора, позволяющего вводить в поток частицы газообразного цезия, что открывает широкие возможности по изучению горения в сверхзвуковых потоках.

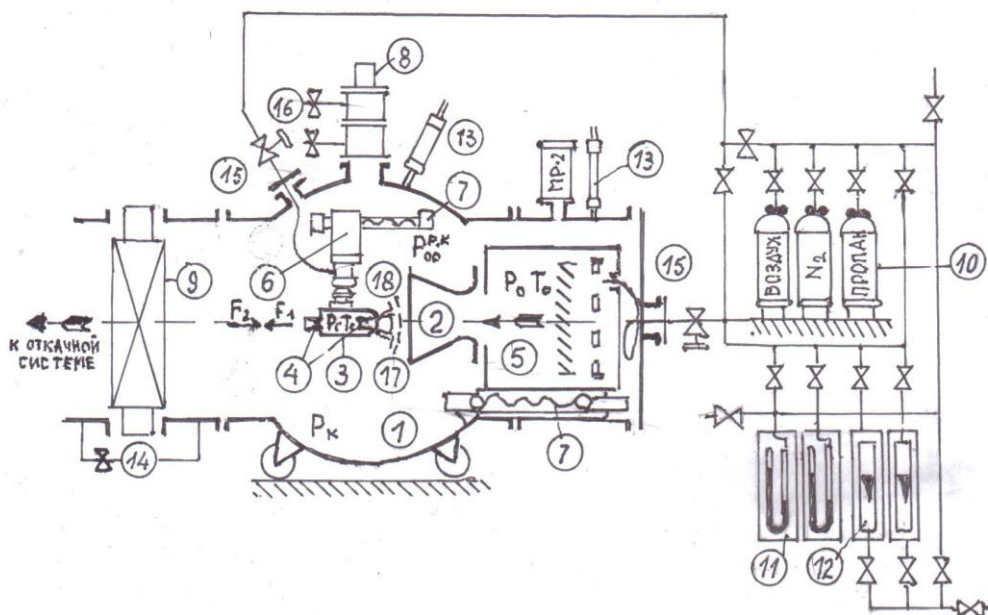


Рис. 4.3 — Схема установки ВУ-1: 1 – рабочая камера; 2 – сверхзвуковое сопло; 3 – модель; 4 – сверхзвуковые сопла; 5 – форкамера; 6 – аэродинамические весы; 7 – координатные механизмы; 8 – электронная пушка; 9 – вакуумный затвор; 10 – баллоны с газом; 11 – U образные манометры; 12 – расходомер; 13 – датчик давления; 14 – перепускной трубопровод; 15 – регулятор расхода газа; 16 – насосы откачки электронной пушки; 17 – зона торможения потоков; 18 – скачки уплотнения;  $P_0, T_0$  – параметры торможения сверхзвукового потока;  $P_0', T_0'$  – параметры торможения струи;  $P_k$  – статическое давление на выходе из сопла;  $n$  – нерасчетность струи;  $F_1, F_2$  – реактивные силы нерасчетной струи и струи в донной области модели;  $F$  – сила сопротивления, действующая на модель

Для организации горения в сверхзвуковых потоках были изготовлены специальные дозаторы, устанавливаемые в основной форкамере, формирующей сверхзвуковой поток. Дозатор содержит стеклянную отпаянную ампулу с жидким цезием. Каждая ампула рассчитана на однократное использование и содержит 1г цезия. В процессе эксперимента ампула разбивается специальным ножом, цезий переливается в корпус дозатора, имеющий подогрев. С помощью регулировки температуры, цезий переводится в газообразное состояние. При этом при температуре 200С давление паров составляет около 15Торр, таким образом цезий подается в форкамеру потока. Образовавшаяся сверхзвуковая смесь пропана, цезия с окислителем воздуха и кислорода загорается, формируя сверхзвуковую горючую смесь.

#### 4.4 Разработка методик измерения и оценки влияния плазменных образований на характеристики камеры сгорания

Как указывалась выше, основное влияние плазменных образований на процессы возгорания и горения топливной смеси в камере сгорания заключается, во-первых, в увеличении температуры топливной смеси за короткое время; во-вторых – в наработке химически активных частиц, увеличивающих скорость протекания реакций в камере сгорания; в-третьих, при принятии дополнительных мер (например, МГД воздействия на плазменное образование) значительное увеличение турбулентности топливной смеси и, следовательно, лучшее перемешивание топлива с окислителем. Сказанное иллюстрирует рис. 4.4. [1].

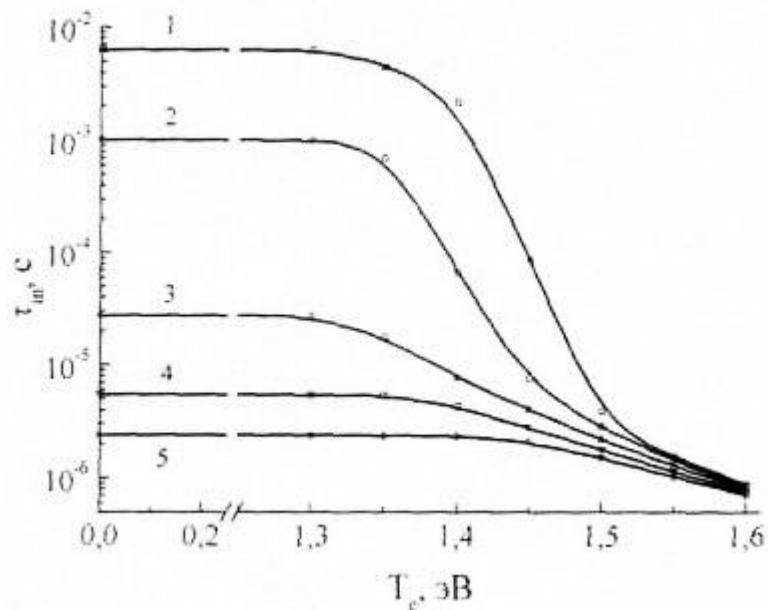


Рис. 4.4 — Зависимость от температуры электронов периода индукции  $H_2 - O_2$  смеси при  $P = 10^5$  Па и мгновенном нагреве газа до различных температур  $T_0$ : 1 – 800 K; 2 – 900 K; 3 – 1000 K; 4 – 1100 K; 5 – 1200 K

#### Выводы

Таким образом, основными физическими величинами, определяющими положительный эффект плазменных образований, являются: 1) время инициации горения; 2) скорость распространения фронта горения; 3) высокий к.п.д. преобразования потребляемой энергии генератора



плазменных образований; 4) степень и скорость перемешивания топлива и окислителя. Как видно из вышеизложенного, основными параметрами, влияющими на данные физические величины при фиксированном составе топливной смеси, являются: 1) температура газа; 2) температура электронов в области плазменных образований; 3) степень турбулентности топливной смеси (в том числе, и перед инициацией горения). Для экспериментального определения этих параметров, а также других параметров, необходимых для проведения расчетов эффективности разрабатываемых методик, следует определять (измерять) следующие величины:

- температуру газа;
- температуру торможения;
- ток в области плазменного образования;
- электрическое поле в области плазменного образования;
- статическое и полное давления;
- время инициации горения;
- скорость распространения фронта горения.

Степень турбулентности топливной смеси можно определять с помощью теневых фотографий. Оценка влияния плазменных образований проводится в несколько этапов. Вначале исследуется данное влияние на температуру нейтральных частиц. За короткое время (до  $1\text{ мс}$ ) необходимо добиться максимального нагрева топливной смеси. Затем, необходимо перейти к оптимизации параметров плазменных образований с целью максимального увеличения температуры электронов, так как при этом резко увеличивается количество химически активных частиц. Далее нужно провести модификацию разряда для ускорения процессов перемешивания топлива и окислителя в присутствии плазменных образований. Немаловажным фактором является увеличение проводимости в области плазмы, поскольку одно из возможных эффективных воздействий на структуру плазменного образования – МГД воздействие [1]. Методы

измерения вышеперечисленных параметров и необходимая аппаратура представлены ниже.

### ***Список литературы***

- 1 Бочаров А.Н., «Физические и численные модели плазменной аэродинамики», автореферат на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук, Москва, 2011г.
- 2 И.В. Кочетов, С.Б. Леонов, А.П. Напартович, «Плазменное инициирование горения в сверхзвуковом потоке в топливно-воздушных смесях. Проблемы моделирования», Химия высоких энергий, т. 40, стр. 126–133, 2006 г.
- 3 Е.Э. Сивкова, «Стабилизация ламинарного метано-воздушного пламени наносекундным разрядом», труды МФТИ, т.1, №3, стр. 151-159, 2009 г.
- 4 A.P. Napartovich, Yu.S. Akishev, A.A. Deryugin, I.V. Kochetov, N.I. Trushkin, “Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control” Part B, ed. by V. M. Penetrante, S. E. Schultheis, NATO ASI Series G 34, pp. 355-370, 1993
- 5 E.I. Mintousov, S.V. Pancheshnyi, A.Yu. Starikovskii //AIAA paper 2004-1013.
- 6 А.Ф. Александров, А.П. Ершов, В.В. Злобин, Р.С. Константиновский, В.А. Черников, В.М. Шибков, «Влияние комбинированного СВЧ разряда на горение пропан-бутан-воздушного высокоскоростного потока», XXXIII Международная конференция по физике плазмы и УТС, г. Звенигород, 13 – 17 февраля 2006г.
- 7 Ю.П. Райзер, «Физика газового разряда», М., Наука, 1987г., 597с.