

# Физика плазмы и плазменные технологии

УДК 533.6. +536.46

## Экспериментальное исследование процессов поджига и стабилизации горения жидких углеводородных топлив электрическим дуговым разрядом

В. А. Битюрин, В. Ю. Великодный, Б. Н. Толкунов, А. А. Быков,  
А. В. Дыренков, В. В. Попов

*Проведены экспериментальные исследования процессов поджига и стабилизации электрическим дуговым разрядом горения углеводородных топлив в сверхзвуковом потоке воздуха. Определены параметры разряда, характеристики пламени (задержка воспламенения). Показано, что средняя энергия, вкладываемая в поток поджигающим устройством, более чем на пять порядков меньше кинетической энергии основного потока газа.*

PACS: 47.70.Pq

*Ключевые слова:* поджиг, время индукции, дуговой разряд, сверхзвуковой поток.

### Введение

Исследование процессов поджига и поддержания горения газообразных и жидких углеводородных топлив в воздухе различными типами электрических разрядов является актуальной задачей для авиации, энергетики и других отраслей народного хозяйства [1—5].

При этом сам процесс горения в многофазных средах, в которых в качестве топлива используются высокомолекулярные углеводороды (керосин, солярка, масло, мазут), является трудным для теоретического расчета и изучения, особенно в момент инициализации горения, поэтому на первый план при решении данной проблемы выступают экспериментальные методы исследования.

Одной из нерешенных проблем является поджиг и поддержание устойчивого горения керосина при полете летательных аппаратов с прямоточным воздушно-реактивным двигателем (ПВРД) на больших высотах при числах Маха  $3 \leq M \leq 5$  в набегающем потоке [3, 5]. Проблема состоит в том, что КПД турбореактивных двигателей резко падает при  $M \geq 3$  в набегающем потоке, а температура воздуха в воздухозаборнике прямоточного двигателя при  $3 \leq M \leq 5$  в набегающем потоке недостаточна для устойчивого поджига и поддержания устойчивого горения авиационного керосина. Сейчас для запуска и испытания экспериментальных моделей летательных аппаратов используется, как правило, самолет-носитель, затем происходит предускорение твердотопливным двигателем модели до чисел Маха, где поджиг и горение керосина становится устойчивым. Ясно, что такая схема неудобна для реальных аппаратов, стартующих с земли, поэтому рассматриваются различные методы поджига и стабилизации горения в сверхзвуковом потоке. Это добавки водорода, силана [6], модификация топлив с использованием барботирования и ударноволновой обработки — "активированное пористое топливо" и двухконтурных систем подачи топлива в камеру сгорания [1, 3, 5]. Одним из перспективных направлений является использование для поджига и поддержания пламени в сверхзвуковом потоке различных типов электрических разрядов, в том числе и дугового. Исследования сосредоточены в направлении сни-

---

**Битюрин Валентин Анатольевич**, директор отделения.  
**Великодный Василий Юрьевич**, ведущий научный сотрудник.  
**Толкунов Борис Николаевич**, ведущий научный сотрудник.  
Объединенный институт высоких температур РАН.  
Россия, 127412, Москва, Ижорская улица, 13/19.  
E-mail: vvelikodny@mail.ru  
**Быков Александр Андреевич**, младший научный сотрудник.  
**Дыренков Александр Владимирович**, инженер.  
Московский физико-технический институт.  
Россия, Москва, 141700, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.  
E-mail: Aleks-Bykov@yandex.ru  
**Попов Владимир Васильевич**, ведущий научный сотрудник.  
Институт прикладной механики РАН.

*Статья поступила в редакцию 6 декабря 2010 г.*

---

© Битюрин В. А., Великодный В. Ю., Толкунов Б. Н., Быков А. А., Дыренков А. В., Попов В. В., 2011

жения энергозатрат, массы и габаритов оборудования. Одной из важных характеристик при изучении поджига и горения является время индукции (задержки воспламенения). Это время, через которое после инициализации каким-либо образом горения (например с помощью электрической искры) топливо начинает устойчиво гореть [6]. Данная характеристика зависит от большого количества параметров: концентрации испаренных в воздухе молекул топлива, спектра размеров капель жидкости, наличия радикалов и продуктов горения, от формы струи, когда из-за сужения или расширения может заметно изменяться температура воздуха, газосодержания струи газозвеси, давления и т. д. Уменьшение времени индукции приводит к уменьшению размера двигательной установки [7, 8], что выгодно энергетически и экономически, а также к обеспечению устойчивости горения топливо-воздушной смеси, что позволяет отказаться от стабилизаторов горения в виде пилонов или уступов в камере сгорания. Кроме того, все это позволяет организовать горение при сверхзвуковых течениях газа в ГПВРД.

Измерить время индукции обычными методами довольно трудно, так как оно составляет доли секунды. В данной работе для определения времени индукции используется сверхзвуковой поток взвеси капель керосина или спирта в воздухе при инициализации и стабилизации горения высоковольтным электрическим дуговым разрядом. При высокой скорости топливно-воздушный поток воспламеняется на заметном расстоянии от места электрической дуги, что позволяет с хорошей точностью измерить расстояние, на котором происходит воспламенение, и, зная скорость потока, определить время индукции.

### Экспериментальная установка

#### Описание экспериментальной установки, ее рабочие характеристики

На рис. 1 показана схема экспериментальной установки. Экспериментальная установка состоит из ресивера 1 общим объемом 560 л, в который накачивался воздух до давления 8—9 атм при комнатной температуре, газового и топливного трактов, сверхзвукового сопла 2, форсунки 7 с впрыском топлива в зоне образования вихря за уступом, высоковольтного источника питания, состоящего из трансформаторов 6 (в сумме 40 кВ), трансформатора 5 с переменным коэффициентом преобразования (ЛАТР) на максимальное выходное напряжение 250 В и электродов 8, установленных в потоке.

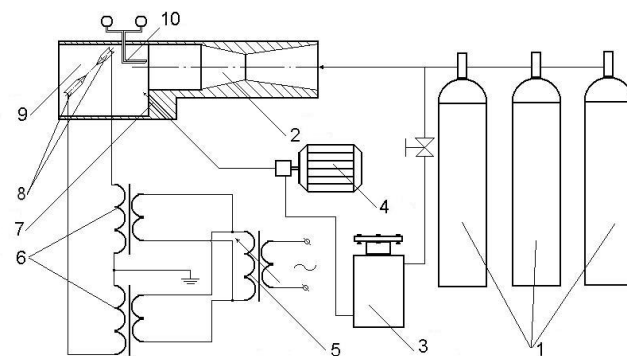


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 — баллоны с газом (ресивер); 2 — сверхзвуковое сопло Лавалья; 3 — бак с топливом; 4 — топливный насос;
- 5 — автотрансформатор переменного напряжения;
- 6 — высоковольтные трансформаторы на 20 кВ каждый;
- 7 — форсунка для впрыска топлива; 8 — электродуговые электроды; 9 — камера сгорания;
- 10 — трубка Пито—Прандтля

Для определения времени стационарного режима работы установки в сверхзвуковой части на выходе из сопла Лавалья (см. рис. 1) устанавливается трубка Пито—Прандтля с дифференциальными манометрами 10, которая может быть легко демонтирована при проведении испытаний с поджигом смеси. Параметры сопла Лавалья:  $D/D^* = 1,54$ ,  $D = 10$  мм, где  $D^*$  — диаметр в критическом сечении сопла,  $D$  — диаметр на срезе при выходе из сопла.

Для определения рабочих характеристик стенда была проведена серия испытаний в "холодном" режиме без подачи топлива. Подавался только воздух из ресивера (при комнатной температуре  $T = 293$  К). В первую очередь было определено число Маха потока на выходе из сопла Лавалья и зависимость его изменения от времени. Показания снимались с помощью трубки Пито—Прандтля. Данные по давлению регистрировались с помощью манометров-вакуумметров. Результаты измерений представлены в таблице.

#### Результаты измерения параметров газового потока

$t$ (с)	Отношение статического давления к давлению торможения $P_{st}/P_{din}$	Число маха М
5	0,20	1,70
10	0,21	1,68
15	0,22	1,65
20	0,23	1,62

Число Маха потока в сверхзвуковой части двигателя определялось из таблиц газодинамических функций [9]. Видно, что в течение первых 15 с параметры потока по скорости (числу Маха) с точностью до 3 % можно считать стационарными. Среднемассовый расход газа в течение этого времени составил  $G_g = 385$  г/с. Из условия реализации

стехиометрического соотношения для воздуха и керосина, составляющего примерно 20:1 при  $\alpha = 1$  (где  $\alpha$  — коэффициент избытка окислителя), был определен требуемый массовый расход жидкости, моделирующей топливо  $G_1 = 22,6$  г/с. Эти данные являются базовыми для определения расхода жидкости (топлива) в камеру сгорания.

Устойчивое горение топлива в сверхзвуковом потоке обеспечивается постоянным источником воспламенения — высоковольтной электрической дугой между электродами 8. Дуга горит в движущейся топливно-воздушной смеси, обеспечивая непрерывное ее зажигание. Топливо подается в зону вихря из форсунки 7 за уступом (см. рис. 1) и смешивается со сверхзвуковым потоком воздуха, истекающим из сопла Лаваля. Струя топлива подается под углом  $135^\circ$  к сверхзвуковому потоку. Форсунка представляет собой трубку из латуни с внутренним диаметром 1,5 мм и длиной 25 мм. Эта трубка вставляется в трубку из пластика на глубину 5 мм. Длина трубки из пластика — 35 мм, ее внутренний диаметр — 2,3 мм. Собственно камера сгорания 9 с внешней стороны представляет собой прямоугольную призму с высотой 50, шириной 30 и длиной 120 мм (см. рис. 1).

Одними из составляющих параметров, которые могут существенным образом повлиять на время задержки воспламенения в сверхзвуковом потоке, являются характеристики дисперсности жидкой фазы (размеры капель). При работе установки измерение среднего диаметра капель жидкой фазы проводилось вблизи его выходного сечения из камеры сгорания 9. Для экспериментального определения средних размеров микрокапель была использована малогабаритная измерительная установка. Ее принципиальная схема и характеристики представлены в [5, 10]. Принцип действия установки основан на использовании метода рассеяния лазерного излучения на микрокаплях. При конструировании и сборке измерительной установки использовалась идея измерения средних размеров микрокапель методом "Больших углов" [7, 11]. Метод "Больших углов" подробно описан в [10]. В качестве моделирующей жидкости нами использовалась вода. При подаче жидкости из форсунки 7 под углом  $135^\circ$  к сверхзвуковому потоку средний диаметр капель составил  $d = 2,5$  мкм (разброс размеров  $\pm 25\%$ ).

### Особенность горения дуги в сверхзвуковом потоке

В отличие от горения дуги в неподвижной среде в движущейся среде происходит сильное охлаждение и увлечение плазменного столба потоком.

Это приводит к сильному увеличению сопротивления дуги и сдвигу вольтамперной характеристики разряда вверх по напряжению. Увлечение плазменного столба приводит к его растяжению и, в конечном счете, к разрыву. Для возобновления горения дуги необходимо повторное ее зажигание. Таким образом, горение дуги нестационарное, после зажигания происходит ее сдувание, растягивание, охлаждение и погасание. Вольтамперная характеристика дуги при этом сдвигается в область высокого напряжения, что предъявляет высокие требования к источнику питания. Напряжение источника питания должно превышать пробивное напряжение межэлектродного промежутка. В эксперименте расстояние между дугowymi электродами составляет 1 см, при этом минимальное пробивное напряжение составляет 30 кВ. Для надежности зажигания и горения дуги на электроды подается напряжение 40 кВ от высоковольтного источника питания.

### Высоковольтный источник питания дуги

Высоковольтный источник питания создает переменное напряжение амплитудой 40 кВ. Он состоит из двух повышающих трансформаторов 6 на напряжение до 20 кВ и ЛАТР. Вторичные обмотки трансформаторов соединены последовательно с заземлением средней точки, которое обеспечивает более равномерное распределение электрического поля в дуговом промежутке и предотвращает "притяжение" дуги к металлическим частям конструкции. Первичные обмотки трансформаторов соединены параллельно и подключены к ЛАТР, на котором устанавливается нужное напряжение. Средний ток через дугу составляет 0,12 А, средняя активная мощность, выделяемая в дуге, — 167 Вт. Активная мощность электрической дуги вычислялась путем снятия данных с осциллографа (тока и напряжения), их перемножения и последующего интегрирования за период колебания сетевого напряжения (частота 50 Гц). Энергия за период умножается на частоту и получается средняя мощность. Погрешность измерения определялась точностью осциллографа по вертикали для каждого канала. Используемый осциллограф (Tektronix TDS320) имеет точность по вертикали 2%. Вследствие этого систематическая погрешность измерения мощности оценивалась на уровне 3%.

Для сравнения отметим, что при скорости потока  $M = 1,7$  и расходе газа  $G = 0,385$  кг/с мощность основного потока составляет 39 кВт с разбросом  $\pm 5\%$  (мощность потока определяется как половина произведения массового расхода газа на квадрат скорости). Ток дуги в быстродвижущейся

среде имеет форму "синусоиды с паузами" и амплитуду 0,5 А. Длительность тока дуги составляет 0,7 периода колебаний сетевого напряжения, когда мгновенное значение переменного напряжения источника питания превышает пробивное напряжение промежутка.

В идеале нужно использовать источник постоянного высокого напряжения с падающей характеристикой. В течение существования тока дуга зажигается, растягивается и гаснет много раз. Поэтому падение напряжения на дуге быстро меняется и занимает весь диапазон напряжений от напряжения горения дуги в неподвижной среде (в момент зажигания — 500 В) до пробивного напряжения промежутка (момент погасания и повторного зажигания — 15 кВ). При этом на осциллограммах напряжения дуги видны беспорядочные "иглы". Максимальная амплитуда "иглы" 15 кВ.

Мгновенная мощность, выделяемая в дуге, также непрерывно меняется много раз в течение существования тока разряда, а именно, от 0 до 7,5 кВт (вблизи момента погасания и зажигания разряда). При этом можно говорить только о *средней* мощности за период сетевого напряжения, которая и составляет 167 Вт с разбросом  $\pm 3\%$ .

### Результаты эксперимента

Полномасштабный эксперимент проходил в следующем порядке. В ресивер 1 до 8—9 атм. закачивался воздух. В топливный бачек 3 заливался керосин или спирт. Для того чтобы горение проходило в течение заведомо короткого времени и не было разрушения стенок камеры сгорания и защитных стенок (они выполнены из оргстекла), использовалось 63 г топлива из расчета, чтобы время поджига и горения не превышало 3 с. Поэтому горение (в соответствии с данными вышеприведенной таблицы) происходит в заведомо стационарных условиях. Далее открывался клапан, и струя сжатого газа попадала в сопло Лавалья, где поток ускорялся. Затем зажигалась дуга между электродами 8, которая некоторое время (порядка 1—2 с) работала без подачи топлива. После открытия клапана и подачи топлива на форсуночное устройство 7 в течение 3 с струя керосина или спирта взаимодействовала со сверхзвуковым потоком, в результате чего происходило перемешивание жидкости и газа и дробление капель. Затем газожидкостный поток проходил через зону дуги и поджигался. После работы в течение 3 с камеры сгорания срабатывало защитное устройство, и в зону пламени подавался углекислый газ. Затем цикл эксперимента повторялся в той же последовательности, как указано выше. Процесс горения

струи снимался на цифровую видеокамеру PENTAX Optio 330RS в режиме работы ее как кинокамеры со скоростью 15 кадр/с. Быстродействие здесь было не важно, так как процесс горения протекал в квазистационарном режиме в течение 3 с.

Были проведены несколько серий испытаний, получен достаточно надежный поджиг топливно-воздушных смесей керосин + воздух, спирт + воздух. На рис. 2 (керосин + воздух) и рис. 3 (спирт + воздух) показаны отдельные кадры видеосъемки. На рисунках отчетливо видны различные зоны, характеризующие воспламенение и горение. Зона "темного" пламени — это зона индукции, т. е. пространство между дугой и пламенем. Также видны зоны "голубого" или "синего" пламени и зона горения. Такая картина горения углеводородных топлив качественно совпадает с классическими представлениями [6].

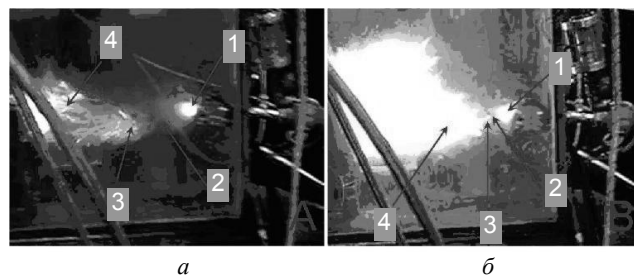


Рис. 2. Эксперимент со струей "воздух + керосин":

а: стадия поджига керосина в течение 0,05—0,08 с:  
1 — собственно дуговой разряд; 2 — зона задержки воспламенения; 3 — зона синего пламени; 4 — зона очагов горения. Время задержки воспламенения составляет  $\tau \approx 3 \cdot 10^{-4}$  с;

б: стадия горения керосина:  
1 — дуговой разряд; 2 — "темная" зона задержки воспламенения; 3 — зона синего пламени; 4 — зона горения. Время задержки воспламенения  $\tau \approx 8,4 \cdot 10^{-5}$  с

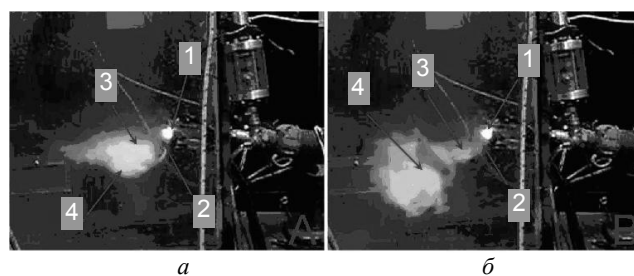


Рис. 3. Эксперимент со струей "воздух + спирт":

а: начальная стадия поджига спирта в течение 0,05—0,08 с:  
1 — дуговой разряд; 2 — "темная зона"; 3 — зона синего пламени; 4 — зона очагов возгорания. Время индукции воспламенения  $\tau \approx 9,8 \cdot 10^{-5}$  с;

б: стадия горения спирта, продолжительность горения  $\sim 2,5$  с:  
1 — дуговой разряд; 2 — "темная зона"; 3 — зона синего пламени; 4 — область интенсивного горения. Время индукции воспламенения  $\tau \approx 5,6 \cdot 10^{-5}$  с

Сравнивая расстояния между интересующими точками с размерами призмы камеры сгорания (см. рис. 2 и 3), можно определить расстояние ме-

жду данными точками, а также размеры течения, зоны задержки воспламенения и фронта пламени. Для этого с помощью программы PhotoShop определяется количество пикселей, которые формируют изображение призмы, размеры которой известны. Затем определяется, какой линейный размер приходится на один пиксель. После этого, определяя расстояние в пикселях между двумя точками на изображении, можно определить это расстояние в метрах. Числа Маха потока в зависимости от времени работы установки представлены в вышеуказанной таблице. Из этих данных находится скорость потока с использованием газодинамических таблиц [9]. В результате находим время индукции в различных режимах, что отражено в подписях к рис. 2 и 3.

Следует отметить, что для того, чтобы пламя не попадало на защитную стенку "аквариума" из оргстекла, на расстоянии 0,5 м от выходного среза камеры сгорания был установлен защитный экран в виде сетки. Поэтому пламя отражается от сетки, и образуется факел гораздо шире, чем обычно.

В теоретических расчетах [12] времена индукции получаются значительно больше, чем измеренные в эксперименте. Это возможно объяснить тем, что не все механизмы учитываются при работе радикалов, либо кинетическая схема реакции меняется при горении дугового разряда. Обычно в экспериментах с использованием разрядов для поджига и стабилизации пламени [2, 4] времена индукции на порядок выше, чем получено в данных экспериментах. Так как средняя энергия разряда мала по сравнению с энергией основного потока, то значительного нагрева всей массы потока электрической дугой не происходит. Однако в дуге разряда достигаются значительные плотности тока, за счет чего температура в области плазменного шнура может достигнуть нескольких тысяч градусов. Следовательно, время индукции уменьшается не только за счет наработки радикалов в плазме, но и из-за сильного локального увеличения температуры. Известно [6], что сочетание радикального и температурного факторов приводит к максимальному эффекту снижения времени индукции. Далее часть топливно-воздушной смеси, попавшая в плазменный шнур, и поджигает остальной топливно-воздушный поток. Характерно, что время жизни дуги  $\sim 10^{-4}$ — $10^{-5}$  с коррелирует со временем задержки воспламенения  $\tau \sim 10^{-4}$  с, как это видно из рис. 2 и 3.

### Заключение

Можно отметить следующие основные и важнейшие результаты проведенной работы.

- Создана экспериментальная установка для исследования поджига и горения топливно-воздушной струи в сверхзвуковом режиме, определены ее рабочие характеристики.

- Получен устойчивый поджиг и горение сверхзвуковой топливно-воздушной струи с помощью высоковольтного источника питания при невысоком среднем энерговыкладе (по сравнению с кинетической энергией газокапельного потока).

- Методом больших углов измерен средний размер капель жидкости, моделирующей топливо, а именно,  $d = 2,5 \pm 0,635$  мкм.

- Проведены измерения времени индукции зажигания  $\tau$  сверхзвуковой струи воздуха с керосином ( $\tau \approx 3 \cdot 10^{-4}$  с) и воздуха со спиртом ( $\tau \approx 5,6 \cdot 10^{-5}$  с), причем эти параметры коррелируют со временем жизни плазменного (дугового шнура) в сверхзвуковом потоке  $t \sim 10^{-4}$ — $10^{-5}$  с.

### Литература

1. Бушманов Е. А., Великодный В. Ю., Воротилин В. П., Яновский Ю. Г., Тимофеев И. Б., Ван Ви Д. // Прикладная физика. 2003. № 5. С. 49.
2. Еришов А. П., Сурконт О. С., Тимофеев И. Б., Черников В. А., Шибков В. М., Арделян Н. В., Бычков В. Л., Чувашев С. Н., Громов В. Г., Левин В. А. Параметры электродных разрядов для воспламенения сверхзвуковых потоков пропан-воздушной смеси//III Междунар. симпозиум. Термохимические процессы в плазменной аэродинамике. — СПб.: Радиоавионика, 2003. С. 67.
3. Ereemeev A. V., Grishin V. G., Nikitenko L. K., Velikodnyi V. Yu., Vorotilin V. P., Timofeev I. B., Yunovsky Yu. G., D. Van Wie. // AIAA (Paper). 2005. No. 614. P. 1—15.
4. Климов А., Биторин В., Леонов С. Стимулированный поджиг и горение углеводородного топлива с помощью плазменных образований в воздушном потоке// IV Междунар. симпозиум. Термохимические и плазменные процессы в аэродинамике. — СПб.: Радиоавионика, 2004. С. 15.
5. Великодный В. Ю., Воротилин В. П., Еремеев А. В., Никитенко Л. К., Тимофеев И. Б., Ван Ви Д., Яновский Ю. Г. Микропузырьковые технологии в проблеме создания широкодиапазонного гиперзвукового прямоточного воздушно-реактивного двигателя: Сб. тр. конф. "Современные проблемы механики гетерогенных сред". — М.: ИПРИМ РАН. 2005. Т. II. С. 167.
6. Щетинков Е. С. Физика горения газов. — М.: Наука, 1965.
7. Ананьев А. В. Численное исследование процесса горения керосино-воздушной смеси в камерах сгорания ПВРД // Сб. тр. 50-й научной конф. МФТИ, секция космической энергетики и двигателестроения, 2008.
8. Гидасов В. Ю., Москаленко О. А., Пирумов У. Г. // Вестник МАИ. 2004. Т. 16. № 2. С. 51.
9. Федоров Р. М., Мелик-Пашаев Н. И. Таблицы и диаграммы теплофизических величин и газодинамических функций. — М.: Изд-во ВВИА им. Проф. Н. Е. Жуковского, 1968.
10. Циклаури Г. В., Данилин В. С., Селезнев Л. И. Адиабатные двухфазные течения. — М.: Атомиздат, 1973.
11. Velikodnyi V. Yu., Vorotilin V. P., Grishin V. G., Ereemeev A. V., Nikitenko L. K., Timofeev I. B., Van Wie D. Ignition of

Kerosene-Air Mixture in High-Speed Stream. Proc. of Fifteenth Int. Conf. on MHD Energy Conversion and Sixth Int. Workshop on Magnetoplasma Aerodynamics. Moscow. 2005. V. 3. P.741.

12. Битюрин В. А., Филимонова Е. А. О влиянии разряда на многостадийное воспламенение // XXXVII Междунар. (Звенигородская) конф. по физике плазмы и УТС: Тез. докл. 2010. — 1 с.

## Experimental research of burning and set firing of hydrocarbon fuels with an electric arc

*V. A. Bityurin, V. Yu. Velikodnyi, B. N. Tolkunov*

Institute of High Temperatures of the RAS, 13/19 Ijorskay str., Moscow, 127412, Russia

E-mail: vvelikodny@mail.ru

*A. A. Bykov, A. V. Direnkov*

Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institute al., Dolgoprudny, Moscow region,

141700, Russia

E-mail: Aleks-Bykov@yandex.ru

*V. V. Popov*

Institute of Applied Mechanics of the RAS, Moscow, Russia

*Authors experimentally investigated set fire of hydrocarbon fuel and air mixture supersonic stream with electric discharge. Discharge parameters and set fire time were defined. It is shown that average electric energy is less than kinetic stream energy more than 5 orders. Experimental results confirm theoretical models of different authors. The dark zone, cold flame zone and burning zone were observed.*

PACS: 47.70.Pq

*Keywords:* set-fire, set-fire time, arc discharge, supersonic stream.

Bibliography — 12 references.

*Received December 6, 2010*