

УДК 532.542.2

ВЛИЯНИЕ ПУЧКА УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ И ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ГОРЕНИЕ ПРОПАН-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ДОЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА

© 2023 г. П. В. Булат¹, К. Н. Волков¹, *, Л. П. Грачев², И. И. Есаков², В. Л. Бычков³¹Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия²Московский радиотехнический институт РАН, Москва, Россия³Московский государственный университет, Москва, Россия

*E-mail: dsci@mail.ru

Поступила в редакцию 11.05.2022 г.

После доработки 15.08.2023 г.

Принята к публикации 04.12.2023 г.

Рассматривается влияние предварительной ионизации и возбуждения молекул топливно-воздушной смеси при воздействии электронным пучком, созданным во внешнем электрическом поле, на увеличение интенсивности процессов горения. Для исследования воздействия электронно-пучковой плазмы на горение пропан-воздушной смеси проведена серия экспериментов. Определяются характеристики пропан-воздушной смеси до и после облучения электронным лучом в присутствии и в отсутствие внешнего электрического поля. Находятся границы комбинированного воздействия пучка электронов и внешнего электрического поля для повышения эффективности горения пропан-воздушной смеси в дозвуковом потоке. Разрабатывается физическая модель процессов в несамостоятельном разряде в дозвуковом потоке горючей смеси в известных экспериментальных условиях.

DOI: 10.31857/S0040364423060030

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени сформировалось направление, связанное с использованием электронных пучков для активации газов, в состав которых входят органические и химически активные компоненты [1]. Имеются работы по применению электронных пучков для активации горения и конверсии топлива [2–4].

В работе [2] рассматривается применение электронного пучка для изменения параметров обтекания сферы при инъекции электронного пучка через сопло Лавала при одновременном воздействии разряда на пропан-воздушную смесь. В [3, 4] обсуждается применение электронного пучка для создания эффективных условий активации воздуха и его использования для интенсификации горения пропан-воздушной смеси. Результаты, полученные в работе [4], показывают, что увеличение концентрации атомарного кислорода на 0.1–1% в горючей смеси позволяет снизить время воспламенения до 1.5–6 раз. В проведенных исследованиях не учитывается, что появление колебательно- и электронно-возбужденных частиц также улучшает процесс горения и снижает время воспламенения [5]. Широкий спектр исследований по влиянию пучка электронов и влажности воздуха на горение топливно-воздушных смесей проводится в работах [6–10].

Использование электрических разрядов различного типа и лазерного излучения представляется перспективным для инициирования и стабилизации горения в высокоскоростных потоках [11, 12]. Создание индуцированного лазером электрического пробоя применяется для снижения пороговых характеристик зажигания и горения легковоспламеняющихся смесей [13]. Возможность инициирования горения с использованием оптического разряда в сверхзвуковых и трансзвуковых потоках показана в [14]. Экспериментальные данные о влиянии электрического поля на плазму оптического разряда, находящегося в воздушном потоке, приводятся в [15]. В поле постоянной напряженности наличие плазмы оптического разряда способствует электрическому пробоя среды. При этом параметры электрического пробоя зависят от формы электродов, полярности приложенного напряжения и скорости воздушного потока.

Для реализации в технических приложениях различных принципов управления горением требуется понимание физических механизмов распространения разрядов и физических явлений при эволюции плазменных каналов в таких условиях. Совместное влияние потока электронов и внешнего электрического поля может быть использовано для того, чтобы вызвать воспламенение и горение горючей смеси в широком диапазоне давлений.

В данной работе рассматриваются воспламенение и горение горючей смеси при электронно-пучковом воздействии при наличии внешнего электрического поля и без него. Экспериментальные исследования сопровождаются теоретическими разработками, которые показывают хорошее совпадение результатов эксперимента и физической модели процесса горения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для проведения экспериментальных исследований используется комплексная установка (рис. 1), в состав которой входят модернизированный ускоритель электронов ЭОЛ-400М 1, экспериментальная камера 2, устройство обеспечения экспериментов 3, система управления установкой 4, диагностический комплекс 5.

Электронный ускоритель. Для получения электронного потока используется промышленный ускоритель электронов ЭОЛ-400М. Установка представляет собой высоковольтный электронный ускоритель прямого действия с постоянным потоком электронов во время работы.

На основе промышленного ускорителя ЭОЛ-400М получен источник электронного пучка с энергией $E = 300\text{--}320$ кэВ и током $I = 0.1\text{--}4$ мА. Установка предполагает вывод непрерывного ускоренного потока электронов диаметром 1–2 см поочередно через два окна из фольги. Выводные окна ускорителя имеют длину 100 см и ширину 5 см, толщина фольги – 100 мкм. Поток электронов при помощи системы сканирования равномерно перемещается по всей поверхности окон как в продольном, так и в поперечном направлениях. Частота перехода пучка с окна на окно составляет 50 Гц, частота продольной развертки – 300 Гц, поперечной – 5 кГц. Данные параметры системы сканирования позволяют выводить в атмосферу непрерывный пучок с плотностью тока до 60 мкА/см² (учитывается угол рассеяния на фольге выводного окна).

Пучок электронов распространяется в атмосфере на расстояние не более 56.7 см до полного торможения в воздухе. Осевое расстояние от выходного окна ускорителя до фольги не превышает 5 см. Для сбора электронного пучка, выведенного в атмосферу и не используемого в экспериментах,

изготовлен специальный коллектор в виде массивной алюминиевой пластины. Коллектор располагается на расстоянии 3 см от выводного вакуумного окна ускорителя. Система диагностики ускорителя позволяет измерять необходимые параметры с достаточной степенью точности (ошибка измерений не превышает 10%).

Экспериментальная камера. Экспериментальная камера (рис. 2) представляет собой объем с поперечным сечением 30×50 мм² и длиной 500 мм, который ограничен с боков двумя прозрачными стеклянными пластинами 1, 2 толщиной 25 мм, необходимыми для визуального наблюдения. Верхние металлические пластины 3, 4 и расположенная между ними фольга 5 позволяют ускоренным электронам попадать в экспериментальный объем. Толщина алюминиевых пластин составляет 3 мм, а толщина фольги из алюминия – 50 мкм. Размер пластин – 120×500 мм². Прорезь в пластинах для размещения фольги располагается по оси экспериментального объема и имеет размер 20×470 мм². Наличие фольги необходимо для ограничения воздействия внешних факторов на эксперименты. В процессе экспериментов к этим пластинам и фольге подается напряжение $U = 7\text{--}10$ кВ.

Нижняя металлическая пластина 6 предназначена для сбора ускоренных электронов, прошедших через экспериментальный объем. На ней расположены устройство подачи топлива 7, устройство поджигания 8, датчик измерения температуры 13. Пластина изолирована для того, чтобы иметь возможность измерения токовых характеристик. Торцы экспериментального объема через изоляционные прокладки 9, 10 закрыты входным 11 и выходным 12 фланцами. Размеры изоляционных прокладок – $30 \times 80 \times 120$ мм³. Все элементы экспериментальной камеры соединены между собой

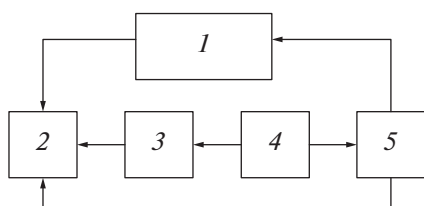


Рис. 1. Блок-схема комплексной экспериментальной установки.

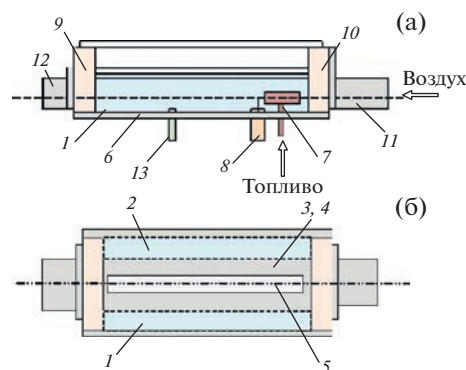


Рис. 2. Экспериментальная камера: вид сбоку (а) и вид сверху (б); 1, 2 – прозрачные стеклянные пластины; 3, 4 – верхние металлические пластины; 5 – фольга; 6 – нижняя металлическая пластина; 7 – устройство подачи топлива; 8 – устройство поджигания; 9, 10 – изоляционные прокладки; 11 – входной фланец; 12 – выходной фланец; 13 – датчик измерения температуры.

настолько плотно, чтобы обеспечить отсутствие влияния окружающей среды на результаты исследований. К входному фланцу 11 присоединен воздухопровод от вентилятора, обеспечивающего поток воздуха для проведения исследований. Выходной фланец 12 соединен с устройством отвода продуктов горения из экспериментального объема.

В начальный момент эксперимента со стороны входного фланца 11 создается воздушный поток. Через устройство подачи топлива 7 в камеру подается пропан, и при помощи системы поджигания 8 полученная смесь воспламеняется. В любой момент до или после поджигания горючей смеси в камере обеспечиваются наличие электрического поля и присутствие пучка ускоренных электронов. Расположенный на пластине 6 температурный датчик 13 позволяет измерять температуру горения смеси.

Система обеспечения экспериментов. В состав оборудования системы обеспечения экспериментов входят система подачи пропана, устройство подготовки смеси, высоковольтное разрядное устройство для поджигания смеси, высоковольтный источник постоянного напряжения, обеспечивающий функционирование разрядного устройства, высоковольтный источник постоянного напряжения для создания электрического поля в камере и воздухопровод с вентилятором для обеспечения воздушного потока.

В качестве источника, обеспечивающего воздушный поток в экспериментальной камере, используется вентилятор. Выход вентилятора соединяется со входным фланцем экспериментальной камеры пластмассовым шлангом диаметром 40 мм. Скорость создаваемого в камере воздушного потока регулируется изменением напряжения питания вентилятора. Для измерения скорости воздушного потока используется анемометр-адаптер АТТ-1000.

Источником высокого напряжения является промышленный источник ИВН-10 с регулируемым выходным напряжением от 0 до 10 кВ. Момент включения источника и длительность его работы задаются системой управления. Для поджигания пропан-воздушной смеси используется высоковольтное разрядное устройство, представляющее собой двухэлектродный разрядник, соединенный с высоковольтным накопительным конденсатором. Зарядка накопительного конденсатора обеспечивается высоковольтным источником постоянного напряжения. В качестве высоковольтного и заземленного электрода разрядника используется вольфрамовая проволока диаметром 0.8 мм.

Накопительный конденсатор системы поджигания подключен к высоковольтному электроду разрядника. Конденсатор заряжается от промышленного высоковольтного источника УВН-20 до напряжения, при котором происходит пробой межэлектродного зазора разрядника. Возникаю-

щая при пробое плазма инициирует поджигание газовой смеси. Уровень энергии инициирующего разряда регулируется при помощи изменения емкости накопительного конденсатора или уровня напряжения его зарядки. В большинстве экспериментов уровень энергии инициирующего разряда составляет 100–200 мДж. Длительность импульса разряда — не более 20 мкс. Длина искры в разряднике не превосходит 1 мм. Промышленный высоковольтный источник УВН-20 позволяет заряжать накопительный конденсатор до напряжения 20 кВ.

Пропан из баллона при помощи редуктора подается в ресивер. Давление в ресивере измеряется подключенным к нему манометром. При открытии импульсного газового клапана необходимая для экспериментов порция пропана подается в систему подготовки смеси. Момент открытия газового клапана и время нахождения его в открытом состоянии задаются системой управления установкой и определяются условиями эксперимента.

Стабильное горение пропан-воздушной смеси проходит при весовом соотношении порции пропана и порции воздуха 1 : 16. Для обеспечения этих условий применяется устройство подготовки газовой смеси. Устройство представляет собой латунный цилиндр с внутренним диаметром 8 мм и длиной 70 мм. Толщина стенки цилиндра — 1 мм. На расстоянии 10 мм с одного из краев цилиндр соединен с медной трубкой для подачи пропана диаметром 4 мм. В верхней части трубки, расположенной внутри цилиндра, имеется отверстие диаметром 0.7 мм для напуска пропана. Нижняя часть трубки соединяется с газовым шлангом системы подачи пропана. Устройство располагается в начальной части экспериментальной камеры и ориентировано короткой частью цилиндра в сторону входного фланца камеры. Пропан, поступающий из системы подачи, распространяется во внутренней области цилиндра в сторону более длинной части из-за ориентации входного отверстия. По мере распространения пропан смешивается с воздухом в необходимой для горения пропорции и поступает в область поджигания смеси.

Выходной конец латунного цилиндра системы подготовки газовой смеси расположен на расстоянии 100 мм от выходного среза экспериментального объема, а на расстоянии 5 мм от него находится искровой зазор разрядника системы поджигания. Цилиндр системы подготовки газовой смеси располагается по центру экспериментальной камеры. Ось цилиндра находится на расстоянии 25 мм от нижней пластины камеры и на 15 мм от стеклянных пластин камеры. Таким образом, 400 мм внутреннего объема экспериментальной камеры предназначены для проведения исследований и размещения диагностического оборудования.

Для оценки размеров элементов системы подготовки газовой смеси используются эмпирические

формулы [16]. Число Маха при истечении пропана через отверстие находится по соотношению

$$M_a = [(p_0/p_a)^{1/8.69} - 1]^{1/2} / 0.65,$$

где p_0 — давление пропана на входе в отверстие, p_a — давление на выходе из отверстия. Скорость пропана на выходе из отверстия составляет $v_a = cM_a$, где c — скорость звука в пропане ($c = 250$ м/с). Весовой расход пропана при истечении через отверстие равен $m_a = \rho_a v_a S_a$, где ρ_a — плотность пропана на выходе из отверстия ($\rho_a = \rho_0 = 1.23 \times 10^{-3}$ г/см³), S_a — площадь сечения отверстия. Согласно оценкам, $M_a = 0.13$, $v_a = 32.5$ м/с, $m_a = 0.73 \times 10^{-2}$ г/с. С использованием формулы для расчета весового расхода оценивается весовой расход воздуха, прошедшего через отверстие заданного сечения, 1.094×10^{-1} г/с. Таким образом, в системе подготовки газовой смеси при скорости потока воздуха 3 м/с создается пропан-воздушная смесь в весовом соотношении порций пропана и воздуха 1 : 15. При сохранении порции пропана, попавшего в систему смешения, и при увеличении скорости протока воздуха через эту систему имеется возможность регулирования процентного соотношения порций пропана и воздуха в смеси. При увеличении скорости потока воздуха в пять раз получается топливно-воздушная смесь в весовых пропорциях 1 : 45.

Система управления. Система управления позволяет синхронизировать включение всех систем и устройств установки для обеспечения требований эксперимента. Принята следующая последовательность включения оборудования комплексной установки.

1. Включается ускоритель электронов. При помощи системы сканирования поток ускоренных электронов выводится в атмосферу через вакуумное окно, под которым располагается коллектор.
2. В начальный момент времени включается вентилятор, обеспечивающий поток воздуха через экспериментальную камеру.
3. В этот же момент времени включается источник высокого напряжения, и в экспериментальной камере создается электрическое поле.
4. При помощи системы сканирования пучок электронов переводится на вакуумное окно, под которым располагается экспериментальная камера.
5. Открывается клапан для напуска пропана.
6. Включается источник питания системы поджигания газовой смеси.
7. Отключается источник питания системы поджигания и последовательно отключаются все включенные ранее системы в последовательности, обратной последовательности включения.

Длительность промежутка времени между включением и выключением каждой из систем обеспечивается системой управления комплексной уста-

новки. Временная диаграмма последовательности включения оборудования приведена на рис. 3.

Используются следующие обозначения:

T_0 — момент включения и выключения ускорителя электронов, контролируется при помощи системы управления пучка электронов. Длительность работы данного устройства определяется оператором, обслуживающим ускоритель, по согласованию с экспериментатором;

T_1 — длительность выключения вентилятора, определяющего наличие потока воздуха в экспериментальной камере, и источника ИВН-10, обеспечивающего присутствие электрического поля в камере ($T_1 = 8$ с);

T_2 — длительность присутствия пучка ускоренных электронов в экспериментальной камере ($T_2 = 4$ с);

T_3 — время, в течение которого открыт клапан для напуска пропана в камеру ($T_3 = 1.5$ с);

T_4 — длительность включения питания источника системы поджигания газовой смеси ($T_4 = 0.07$ с);

T_5 — время задержки включения потока ускоренных электронов после появления потока воздуха и электрического поля в камере ($T_5 = 2$ с);

T_6 — время задержки включения клапана напуска пропана после появления потока электронов в камере ($T_6 = 1.5$ с);

T_7 — время задержки включения источника питания системы поджигания газовой смеси после появления потока пропана в камере ($T_7 = 0.5$ с).

Диагностический комплекс. В диагностический комплекс входят устройство измерения основных характеристик электронного потока, набор пластин для измерения токов в экспериментальной камере, датчики измерения температуры газового пламени и система визуального наблюдения за

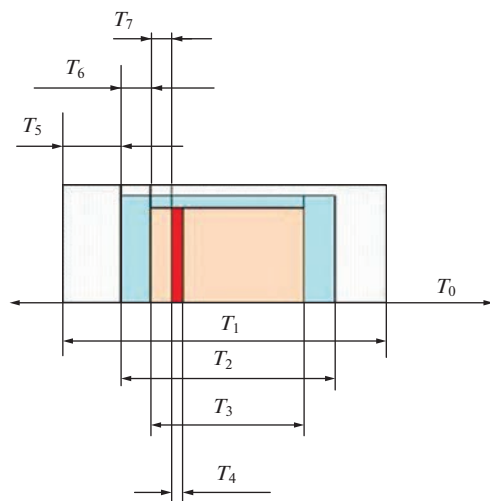


Рис. 3. Временная диаграмма последовательности включения оборудования.

процессами, происходящими в экспериментальной камере.

Параметры электронного пучка на выходном окне ускорителя измеряются средствами диагностики промышленного ускорителя электронов. При включении ускорителя определяются энергия пучка ускоренных электронов и полный ток. При проведении исследований используется пучок с энергией 300–320 кэВ. Полный ток пучка изменяется от 0.1 до 4 мА в зависимости от требований эксперимента.

Для измерения токов, протекающих в экспериментальной камере, применяется набор пластин, являющихся конструктивными элементами экспериментальной камеры.

В качестве температурного датчика используется термопара хромель–алюмель. Этот тип термопар позволяет измерять температуру спаива в пределах 500–1300°C. Температурный датчик представляет собой медную трубку диаметром 6 мм с резьбой на внешней поверхности для возможности закрепления в экспериментальной камере. Внутри этой трубки располагается термопара. Место спаива термопары выведено за пределы медной трубки на 5–7 мм. Измерения температуры проводятся по величине сигнала напряжения на холодном конце термопары. Точность измерений составляет 10–15%. При проведении исследований предполагается размещать этот датчик в различных местах экспериментальной камеры и по его сигналам определять температуру газового пламени. Для расположения датчика температуры в пластине 6 экспериментальной камеры были просверлены отверстия по центру узкой стороны пластины и равномерно по длине широкой стороны. В эти отверстия помещался температурный датчик, так чтобы спаив термопары располагался на расстоянии 10 мм от пластины 6 экспериментальной камеры. Анализируя типичную форму сигнала с температурного датчика, можно сделать заключение, что время, за которое сигнал с датчика выходит на постоянное значение, не более 1 с. Это значение в дальнейшем и считается постоянной времени для данного датчика.

Так как эксперименты по воздействию электронным потоком на процессы горения пропан-воздушной смеси проводятся в условиях повышенной радиации, то непосредственное визуальное наблюдение невозможно. Для проведения визуальных наблюдений создана система, основанная на использовании цифровой видеокамеры и компьютера.

ПОДЖИГ СМЕСИ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО РАЗРЯДА

В серии предварительных экспериментов проверяется работоспособность оборудования комплексной установки в реальных условиях и осуществляется подбор оптимальных временных характери-

стик системы управления. При этом необходимо обеспечить появление стабильного пламени от горения пропан-воздушной смеси в экспериментальном объеме, а также настроить систему сканирования электронного пучка таким образом, чтобы обеспечить попадание максимально возможной части электронного потока в экспериментальный объем. Ускоритель электронов и высоковольтный источник питания не включаются.

Стабильность поджигания и горения полученной пропан-воздушной смеси определяется визуально. На рис. 4 изображены характерные фотографии процесса горения пропан-воздушной смеси.

При скорости воздушного потока менее 0.5 м/с происходит резкое возгорание пропан-воздушной смеси во всем объеме экспериментальной камеры лишь в начальный момент подачи пропана (рис. 4а). Возгорание происходит при давлении в ресивере $p = 1.1$ атм, что является минимальным значением давления, которое можно измерить применяемым манометром. На основании этого следует, что скорость воздушного потока в экспериментальной камере должна быть больше 0.5 м/с.

При скорости воздушного потока в камере 3 м/с и давлении в ресивере $p \geq 2$ атм возгорание и горение пропан-воздушной смеси нестабильны (рис. 4б), что говорит об изменении весовых соотношений между пропаном и воздухом в системе подготовки смеси.

При скорости воздушного потока в камере 3 м/с и давлении в ресивере $p = 1.1$ атм возгорание и горение пропан-воздушной смеси стабильны на протяжении всего промежутка времени, при котором

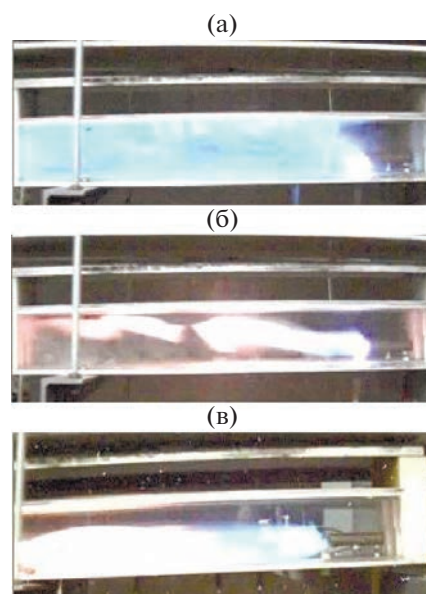


Рис. 4. Фотографии горения пропан-воздушной смеси в экспериментальной камере при скорости воздушного потока менее 0.5 м/с и давлении в ресивере $p = 1.1$ атм (а); 3 м/с, $p > 2$ атм (б); 3 м/с, $p = 1.1$ атм (в).

открыт газовый клапан системы подачи пропана (рис. 4в).

Проведенные эксперименты позволяют определить оптимальное давление пропана в ресивере системы подачи пропана и скорость потока воздуха в экспериментальной камере, необходимые для стабильного горения пропан-воздушной смеси.

ПОДЖИГ СМЕСИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМБИНИРОВАННОГО РАЗРЯДА

Исследования проводятся при воздействии электронным пучком на область горения пропан-воздушной смеси в экспериментальной камере в присутствии или в отсутствие внешнего электрического поля. Принципиальная схема эксперимента приведена на рис. 5. Температура пламени измеряется температурным датчиком, установленным в области горения на расстоянии 12 см от места поджигания газовой смеси.

Влияние электрического поля. Данные исследования предполагают измерения температуры пламени пропан-воздушной смеси при наличии в экспериментальной камере специально созданного электрического поля, а также измерения величины токов, попадающих на пластины P1 и P2 экспериментальной камеры в процессе горения.

В начальный момент в соответствии с временной диаграммой последовательности включения оборудования комплексной установки (рис. 3) в камере создается стабильное пламя от горения пропан-воздушной смеси. Затем измеряются температуры пламени и значения токов на пластины P1 и P2 при различных напряжениях источника S1. Величина напряженности электрического поля в экспериментальном объеме при включении источника S1 оценивается как отношение напряжения источника к зазору между пластинами P1 и P2 камеры. Таким образом, при изменении напряжения источника от 0 до 10 кВ напряженность электрического поля в камере изменяется от 0 до 2 кВ/см. Зависимость температуры пламени от напряженности электрического поля в экспериментальной камере приводится на рис. 6.

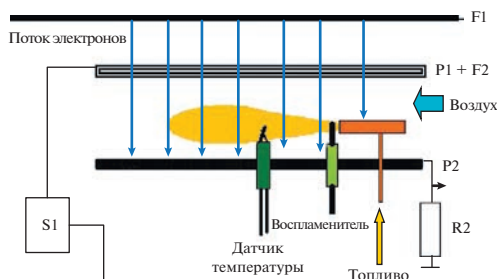


Рис. 5. Схема эксперимента по исследованию воздействия электронным пучком и электрическим полем на горение пропан-воздушной смеси.

Форма и амплитуда сигналов на пластинах P1 и P2 одинаковые и отличаются только полярностью. Так как от источника S1 на пластину P1 подается сигнал положительной полярности, ток на этой пластине имеет положительную полярность, а ток на пластине P2 — отрицательную.

При стабильном горении пропан-воздушной смеси в камере проведено измерение зависимости тока на пластину P2 от напряженности электрического поля в экспериментальном объеме (рис. 7). Ток на пластину P2 возрастает на 18–20% при увеличении напряженности электрического поля в экспериментальной камере в 1.5 раза. Это говорит о том, что в камере реализуются условия для дополнительной ионизации в электрическом поле при повышении температуры и локальном понижении плотности.

Влияние потока ускоренных электронов. В данных исследованиях измеряются температуры пламени пропан-воздушной смеси при наличии в камере потока ускоренных электронов, а также токи, попадающие на пластины P1 и P2 экспериментальной камеры в процессе горения.

В начальный момент в соответствии с временной диаграммой на рис. 3 в камере создается стабильное пламя от горения пропан-воздушной смеси. Затем проводятся измерения температуры пла-

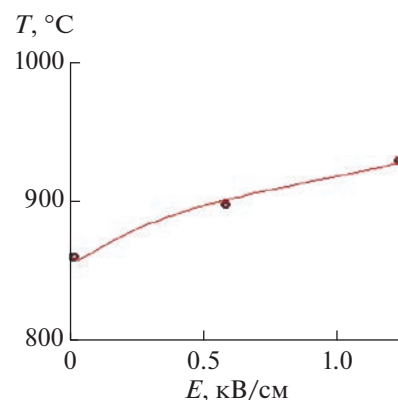


Рис. 6. Зависимость температуры пламени от напряженности внешнего электрического поля.

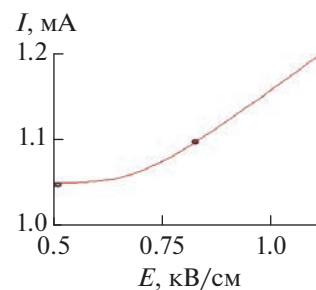


Рис. 7. Зависимость тока на пластину P2 от напряженности электрического поля в экспериментальной камере.

мени и значений токов на пластины P1 и P2 при наличии потока ускоренных электронов в камере.

Ток на пластину P2 незначительно возрастает при горении пропан-воздушной смеси в экспериментальной камере. Это возрастание составляет не более 10–12% от полного тока, попавшего на пластину. Следует отметить, что это значение практически не изменяется при возрастании тока пучка от минимального до максимального значения. Ток, попадающий на пластину P1, существенно больше тока, попадающего на пластину P2, поэтому его изменения при горении пропан-воздушной смеси зафиксировать достаточно трудно, так как это изменение в абсолютных значениях незначительно.

Характерные фотографии процессов в экспериментальной камере при проведении данного цикла экспериментов показаны на рис. 8.

Температура пламени при наличии и отсутствии электронного пучка меняется незначительно. При увеличении тока пучка от максимального до минимального значения температура пламени увеличивается на 2–4% по сравнению со значением, соответствующим пламени без пучка. Пучок ускоренных электронов влияет на процесс горения пропан-воздушной смеси существенно только с точки зрения повторяемости результатов. Возрастание температуры пламени и значений ионных токов при наличии электронного пучка незначительно.

Влияние потока ускоренных электронов и электрического поля. В данных исследованиях измеряются температуры пламени пропан-воздушной смеси при наличии в экспериментальной камере потока ускоренных электронов и специально созданного электрического поля, а также величины токов, попадающих на пластины P1 и P2 экспериментальной камеры в процессе горения при комплексном воздействии поля и пучка электронов на пламя.

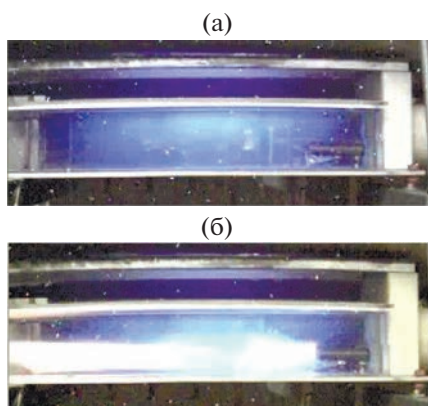


Рис. 8. Фотография свечения воздуха под воздействием электронным пучком в объеме камеры (а) и фотография пламени при горении пропан-воздушной смеси и свечения воздуха под воздействием электронным пучком (б).

В начальный момент в соответствии с временной диаграммой (рис. 3) включается все оборудование, задействованное в экспериментах. Затем проводятся измерения температуры пламени и значений токов на пластину P2. Значение ионного тока в процессе эксперимента определяется по уровню сигнала с сопротивления R2.

На основании полученных данных построены зависимости ионного тока в камере при ионизации газовой смеси электронным пучком и тока в процессе горения газовой смеси от полного тока электронного пучка (рис. 9). Значение ионного тока в процессе горения определяется как разность максимального ионного тока на пластине P2 и ионного тока при ионизации газовой смеси электронным пучком.

При комплексном воздействии электронного пучка и внешнего электрического поля на процесс горения пропан-воздушной смеси температура пламени существенно повышается. По результатам проведенных экспериментов построен график зависимости температуры горения пропан-воздушной смеси от тока электронного пучка при фиксированном значении электрического поля ($E = 1$ кВ/см), приведенный на рис. 10.

Комплексное воздействие внешним электрическим полем и электронным потоком существенно влияет на динамику процесса горения пропан-воздушной смеси. Температура пламени при комплексном воздействии увеличивается более чем на 40% по сравнению с температурой без воздействия. Токи на пластину P2 возрастают почти в пять раз по мере увеличения интенсивности потока ускоренных электронов.

Бедная смесь. Проводятся эксперименты по комплексному воздействию электрическим полем и электронным пучком на обедненную горючую смесь. Используется вентилятор, обеспечивающий поток воздуха в экспериментальной ка-

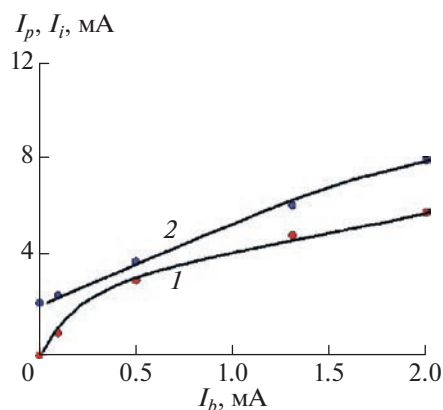


Рис. 9. Зависимости ионного тока I_i в камере при ионизации газовой смеси электронным пучком (1) и тока I_p в процессе горения газовой смеси (2) от полного тока электронного пучка.

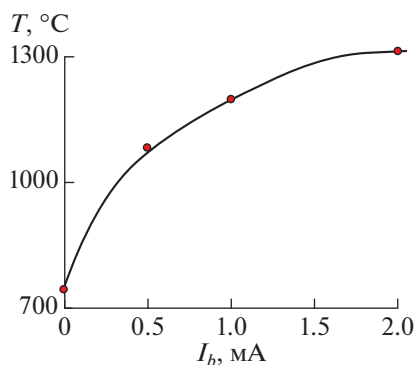


Рис. 10. Зависимость температуры горения пропан-воздушной смеси от тока электронного пучка при фиксированном значении электрического поля $E = 1$ кВ/см.

мере со скоростью до 25 м/с. За счет изменения скорости имеется возможность изменения весовых пропорций пропан-воздушной смеси.

При скорости воздушного потока (при увеличении объема воздуха в камере в единицу времени) более 15 м/с и сохранении объема поступающего пропана наблюдаются нестабильное горение газовой смеси или полное отсутствие возгорания. Это говорит об изменении весовых пропорций пропана и воздуха и получении бедной газовой смеси.

На рис. 11 изображена зависимость ионного тока на пластину P2 от скорости воздушного потока. Увеличение скорости потока воздуха в пять раз (до 15 м/с) уменьшает значение тока на пластину P2 более чем в три раза. При дальнейшем увеличении скорости воздушного потока горение становится нестабильным или полностью прекращается, и тока на пластину P2 нет.

На основании проведенных экспериментов установлено, что при скорости воздушного потока $V > 15$ м/с горение пропан-воздушной смеси нестабильно, а ток на пластину P2 отсутствует. Получена обедненная пропан-воздушная смесь, и при скорости воздушного потока $V \geq 15$ м/с можно проводить исследования по комплексно-

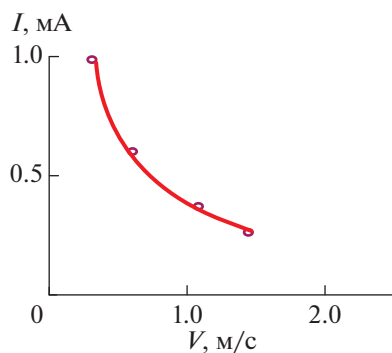


Рис. 11. Зависимость тока на пластину P2 от скорости воздушного потока.

му воздействию на процесс горения электронного пучка и электрического поля.

Основным источником информации при исследовании поджигания и горения обедненной пропан-воздушной смеси являются визуальные наблюдения. На рис. 12а представлена фотография одной из фаз горения бедной горючей смеси при отсутствии воздействия на пламя пучка электронов и электрического поля, а на рис. 12б — при наличии воздействия на пламя и пучка электронов, и электрического поля.

При отсутствии воздействия на пламя пучка электронов и электрического поля горение нестабильно. При скорости воздушного потока более 15 м/с температура пламени не превосходит $T = 400^\circ\text{C}$.

При комплексном воздействии электрическим полем и электронным пучком температура пламени резко возрастает ($T = 700^\circ\text{C}$) по сравнению с температурой пламени, измеренной в экспериментах без пучка электронов ($T = 400^\circ\text{C}$). В экспериментах наблюдается хорошая повторяемость полученных результатов, что говорит о стабильности горения бедной пропан-воздушной смеси.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ

При инъекции в камеру быстрые электроны проходят два слоя фольги из титана и алюминия. Оценим энергию E_0 электронов, инжектированных в фольгу толщиной δ с энергией 350 кэВ, реализующуюся на выходе из фольги, и плотность тока быстрых электронов в камере. Литературные данные [17] позволяют оценить возможные параметры электронного пучка в экспериментах. Оценки приведены в табл. 1 в зависимости от металла фольги и эффективного угла рассеяния электронов.

Эффективный угол рассеяния электронов полагается равным $\theta = 60^\circ$ (электроны на выходе из фольги становятся нерелятивистскими). Предположим, что электроны должны пролететь объем вы-

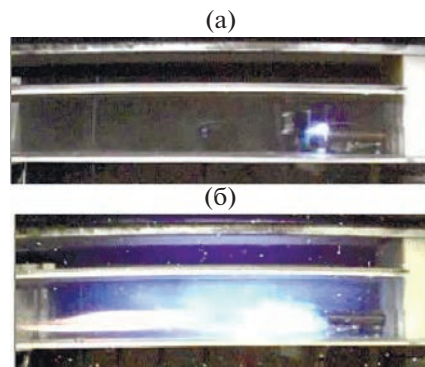


Рис. 12. Фотографии фазы горения бедной горючей смеси при отсутствии воздействия на пламя (а) и при комплексном воздействии на пламя пучком и полем (б).

Таблица 1. Параметры электронного пучка при $\theta = 60^\circ$

Металл	δ , мкм	ρ , г/см ³	E_0 , МэВ
Al	50	4.51	0.268
Ti	50	2.63	0.123
Слой	50 Ti + 50 Al		0.038
Слой	50 Al + 50 Al		0.21
Слой	20 Ti + 50 Al		0.15

сотой 70 мм, шириной 20 мм и длиной 100 мм (используются параметры установки). Учитывая эффективный угол рассеяния, получаем, что плотность тока на расстоянии 30 мм от плоскости инжекции равна $j_{b1} = I_0/70$ А/см², а на расстоянии 70 мм — $j_{b2} = I_0/160$, что дает для тока $I_0 = 3 \times 10^{-3}$ А следующие значения: $j_{b1} = 4.3 \times 10^{-5}$, $j_{b2} = 1.9 \times 10^{-5}$ А/см².

Мощность, вложенная электронным пучком в пропан, W (в эВ/(см³ с)) и скорость возбуждения атомных частиц Q (в см⁻³/с) связаны соотношением [18, 19] $Q = W/U_i$, где U_i — напряжение ионизации (для воздуха $U_i = 31.6$ эВ). Скорость возбуждения W в воздухе связана с параметрами релятивистского электронного пучка (энергия электронов составляет $E_b = 200$ – 500 кэВ) в воздухе соотношением [18, 19] $W = 10^{22} j_b P$, где плотность тока пучка выражена в А/см², а давление — в атм, а в случае нерелятивистского пучка (при $E_b < 150$ кэВ) — соотношением $W = 4 \times 10^{22} j_b P$.

В условиях экспериментов оценки дают $W = 10^{17}$ – 10^{18} эВ/(см³ с) при соответствующей плотности тока пучка 10^{-5} – 10^{-3} А/см². Известно, что ток ионов I_i , их подвижность K_i , концентрация N_i и внешнее электрическое поле E , приложенное к области измерения, связаны в условиях плазмы соотношением [20] $I_i = e K_i E N_i S_e$, где e — заряд электрона, S_e — площадь измерительных электродов. При известных токе, напряженности поля, подвижности ионов и площади измерительных электродов оценим концентрацию ионов, реализуемых в эксперименте. Предполагая, что подвижность положительных ионов, ток которых измерен в эксперименте во внешнем электрическом поле $E = 1.75$ кВ/см, равна $K_i = 2.5$ – 3 см²/(В с) [21], получаем, что средняя концентрация ионов при то-

ке ионов $I_p = 1$ мА (при токе пучка $I_b = 0.1$ мА) составляет $N_i = 1.1 \times 10^{11}$ см³.

Для условий эксперимента при отсутствии горения во внешнем электрическом поле $E = 1.75$ кВ/см сделан расчет ионного состава плазмы при возбуждении смеси пучком с мощностью в диапазоне $W = 2 \times 10^{18}$ – 2×10^{20} эВ/(см³ с).

Сделаем оценку при скоростях потока порядка 3 м/с и давлении $p = 10^5$ Па. Динамическое давление составляет $\rho v_a^2/2 \sim 10$ Па. Из уравнения состояния идеального газа следует сравнение с плотностью энергии в потоке [17] $\epsilon = p/[(\gamma - 1)\rho] \sim 10^5$ Дж/кг $\gg 0.5 v_a^2 \sim 10$ Дж/кг. Следовательно, давление считается постоянным ($p = \text{const}$). Условие постоянства расхода имеет вид $\rho v S = \text{const}$, где S — площадь поперечного сечения канала, поэтому $\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2$, следовательно, $v_2 = v_1 T_2/T_1$.

В эксперименте реализуется скорость потока газа около 2 м/с, нагрев пучком происходит на длине 0.2 м, поэтому длительность нагрева пучком — около 0.1 с. Температуры берутся из имеющихся расчетов. В табл. 2 приведены результаты для коэффициента увеличения температуры ($k = T_2/T_1$, $T_1 = 300$ К) для разных газовых сред и внешних плазмообразующих воздействий разной мощности на момент времени, равный 0.1 с. Звездочка в ячейке ставится для вариантов, в которых происходит воспламенение за время 100 мс. В этом приближенном случае не учитывается возможная релаксация температуры после прохождения траекторией зоны действия пучка.

Из расчетов время воспламенения первоначально холодной стехиометрической пропано-воздушной смеси оказывается равным 9×10^5 – 1.0×10^5 мкс при воздействии электронным пучком со скоростью возбуждения $W = 10^{18}$ – 10^{19} эВ/(см³ с). Температура газа в этом случае достигает $T \sim 2600$ К. В случае несамостоятельного разряда при внешнем электрическом поле $E = 3$ кВ/см и возбуждении электронным пучком $W = 10^{18}$ – 10^{19} эВ/(см³ с) время воспламенения составляет 7×10^4 – 1.0×10^4 мкс. Температура газа в этом случае достигает $T = 2800$ К.

Таблица 2. Коэффициент увеличения температуры

Параметр	Плазма воздуха				Плазма смеси воздуха с 1% паров воды				Плазма смеси воздуха с пропаном				Плазма смеси воздуха с пропаном и парами воды			
	10^{18}	10^{19}	10^{18}	10^{19}	10^{18}	10^{19}	10^{18}	10^{19}	10^{18}	10^{19}	10^{18}	10^{19}	10^{18}	10^{19}	10^{18}	10^{19}
W , эВ/(см ³ с)	10^{18}	10^{19}	10^{18}	10^{19}	10^{18}	10^{19}	10^{18}	10^{19}	10^{18}	10^{19}	10^{18}	10^{19}	10^{18}	10^{19}	10^{18}	10^{19}
E , кВ/см	0	0	3	3	0	0	3	3	0	0	3	3	0	0	3	3
Воспламенение		*	*	*							*	*				
T , К	676	2290	2345	2376	323	588	346	740	335	710	2800	2800	335	630	365	1000
k	2.25	7.63	7.82	7.92	1.08	1.96	1.15	2.47	1.12	2.37	9.33	9.33	1.12	2.1	1.22	3.33

Проведен специальный расчет с экспериментальными входными данными: $W = 10^{17}$ эВ/(см³ с), $E = 1.5$ кВ/см (пучок выключается после прохождения траектории 20 см) со скоростью 2 м/с. Расчет проводится в наиболее реальных плазмохимических условиях: рассматривается модель плазмы смеси воздуха, 1% паров воды, 4% пропана. Время расчета — 500 мс. Расчет без учета выключения пучка показывает, что за время 100 мс газ нагревается на 4 градуса. Сухой воздух при этом плазмообразующем воздействии нагревается за 100 мс до 500 градусов, разряд происходит через 340 мс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования по влиянию возбуждения электронно-пучковой плазмы и внешнего электрического поля на горение пропан-воздушной смеси в условиях дозвукового потока. Измерены характеристики потока пропан-воздушной смеси до и после облучения электронным потоком в присутствии и в отсутствие внешнего электрического поля.

Результаты проведенных исследований показывают, что раздельное воздействие электронным пучком и внешним электрическим полем не оказывает значительного влияния на процессы горения пропан-воздушной смеси. При комплексном воздействии электрическим полем и пучком ускоренных электронов на процесс горения пропан-воздушной смеси существенно возрастает температура пламени и улучшается стабильность протекающих процессов. Данные результаты характерны как для оптимальных весовых соотношений пропана и воздуха в горючей смеси, так и для бедной газовой смеси.

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).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов Г.Я., Герасимова Т.С., Макаров В.Н., Фадеев С.А. Моделирование физико-химических процессов образования оксидов азота и серы при электронно-лучевой очистке отходов тепловых электростанций // ХВЭ. 1996. Т. 30. № 1. С. 34.
2. Klimov A., Bityurin V., Kuznetsov A., Tolkunov B., Vystavkin N., Vasiliev M. External and Internal Plasma-assisted Combustion // AIAA Paper 2004—1014.
3. Шарафутдинов Р.Г., Зарвин А.Е., Мадирбаев В.Ж., Гагачев В.В., Гартвич Г.Г. Получение водорода из

метана в электронно-лучевой плазме // Письма ЖТФ. 2005. Т. 31. № 15. С. 23.

4. Ardelyan N., Bychkov V., Gromov V., Kosmachevskii K. Application of Two Plasma Ignition Enhancement Methods of Propane-air Mixture // AIAA Paper 2006—0612.
5. Zhukov V.N., Sechenov V.A., Khorunzhenko V.I., Starikovskii A.Yu. Hydrocarbon-air Mixture Ignition Kinetics // Proc. 3rd Workshop on Thermochemical and Plasma Processes in Aerodynamics. 28—31 July 2003. Saint Petersburg, Russia, 2003. P. 296.
6. Ardelyan N.V., Bychkov V.L., Kosmachevskii K.V. Features of Combined Plasmas // IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. V. 36. № 6. P. 2892.
7. Ardelyan N., Bychkov V., Kosmachevskii K., Denisiuk S., Gudovich V., Bychkov D., Kochetov I. Electron-beams for Plasma Impact on Gas Flammable Mixtures // AIAA Paper 2009—0693.
8. Bychkov V.L., Kochetov I.V., Bychkov D.V., Volkov S.A. Air-propane Mixture Ionization Processes in Gas Discharges // IEEE Trans. Plasma Sci. 2009. V. 37. № 12. P. 2280.
9. Ardelyan N.V., Bychkov D.V., Bychkov V.L., Gudovich V.A., Denisiuk S.V., Kochetov I.V., Kosmachevskii K.V. Non-selfmaintained Gas Discharge for Plasma Impact on Gas Flammable Mixtures // AIAA Paper 2010—0269.
10. Ardelyan N.V., Bychkov V.L., Kochetov I.V., Kosmachevskii K.V. On Pulsed Discharge in Humid Air // AIAA Paper 2010—1589.
11. Phuoc T.X. Laser-induced Spark Ignition Fundamental and Applications (Review) // Opt. Lasers Eng. 2006. V. 44. P. 351.
12. Leonov S.B., Firsov A.A., Shurupov M.A., Michael J.B., Shneider M.N., Miles R.B., Popov N.A. Femtosecond Laser Guiding of a High-voltage Discharge and the Restoration of Dielectric Strength in Air and Nitrogen // Phys. Plasmas. 2012. V. 19. № 12. 123502.
13. Takahashi E., Sakamoto S., Imamura O., Ohkuma Y., Yamasaki H., Furutani H., Akihama K. Fundamental Characteristics of Laser Breakdown Assisted Long Distance Discharge Ignition // J. Phys. D: Appl. Phys. 2019. № 52. 485501.
14. Зудов В.Н., Третьяков П.К. Инициирование оптическим разрядом гомогенного горения топливо-воздушной смеси в высокоскоростной струе // ФГВ. 2017. Т. 53. № 3. С. 18.
15. Зудов В.Н., Тупикин А.В. Влияние электрического поля на оптический разряд в воздушном потоке // Сиб. физ. журн. 2021. Т. 16. № 2. С. 48.
16. Лойцянский Л.Г. Механика жидкостей и газов. М.: Наука, 1970. 880 с.
17. Черняев А.П. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом. М.: Физматлит, 2004. 152 с.
18. Бычков В.Л., Елецкий А.В. Пучковая плазма высокого давления // Химия плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1985. Вып. 12. С. 119.
19. Бычков В.Л., Васильев М.Н., Коротеев А.С. Электронно-пучковая плазма: генерация, свойства, приложения. М.: Изд-во МГОУ “Росвузнаука”, 1993. 168 с.
20. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 536 с.
21. Фланнери М.Р. Ион-ионная рекомбинация в разрядах высокого давления. В кн.: Газовые лазеры. М.: Мир, 1986. 177 с.