

УДК 621.452.22

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ СВЧ-РАЗРЯДОМ

© 2024 г. Д. Н. Кузьмичев¹, В. Ю. Александров¹, А. В. Рудинский^{1,2,*},
К. Ю. Арефьев^{1,2}, А. В. Кравченко¹, Е. В. Джамай¹

¹ ФАУ «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова», Москва, Россия

² ФГБОУВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», Москва, Россия

*E-mail: avrudinskiy@ciam.ru

Поступила в редакцию 15.02.2023 г.

После доработки 20.03.2024 г.

Принята к публикации 23.04.2024 г.

В работе представлены результаты экспериментальной апробации системы воспламенения природного газа в воздушном потоке посредством СВЧ-разряда. Данные получены применительно к модельному генератору высокоэнтальпийного воздушного потока. Установлены диапазоны давлений для устойчивого воспламенения смеси воздух + природный газ при соотношении компонентов топлива, близком к стехиометрическому. Полученные данные могут быть использованы при анализе характеристик систем воспламенения для генератора высокоэнтальпийного воздушного потока и энергосиловых установок.

DOI: 10.31857/S0040364424030102

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальной является разработка широкодиапазонных генераторов высокоэнтальпийного воздушного потока (ГВВП) для технологических [1], энергетических [2, 3] и силовых [4, 5] установок. Практический интерес вызывают ГВВП стендовых систем для огневого подогрева воздушного потока с компенсацией кислородного баланса [6]. При этом также актуальным становится применение в качестве горючего для ГВВП природного газа (ПГ). Использование ПГ обусловлено относительно высокой теплотворной способностью (около 50 МДж/кг), экологичностью, низкой стоимостью и удовлетворительными эксплуатационными свойствами. Кроме того, для стендовых ГВВП при отсутствии жестких требований к массово-габаритным характеристикам использование ПГ является предпочтительным в связи с минимальным изменением термодинамических свойств и химического состава генерируемого воздушного потока [7].

В полной степени не решена техническая задача обеспечения стабильного и надежного многократного инициирования горения ПГ в воздушных средах при давлениях до 20 бар. Причинами этого являются узкий концентрационный диапа-

зон воспламенения ПГ, а также низкая скорость протекания химических реакций образования продуктов сгорания воздуха и ПГ. При стандартных условиях объемные концентрационные пределы распространения пламени для метана, входящего в состав ПГ, в воздушной среде составляют от 4.4% до 17%, что соответствует коэффициенту избытка окислителя от 2.27 до 0.51 соответственно. При этом температура стабильного самовоспламенения стехиометрической смеси составляет более 800 К, а период задержки воспламенения находится в диапазоне от 10^{-3} до 10^{-2} с [8, 9], что выше, чем для других применяемых газозобразных углеводородных горючих.

Известны системы воспламенения, основанные на различных физических принципах: электроискровые [10, 11], плазменные с электродуговым разрядом [12, 13], газодинамические [14–16], лазерные [17, 18], пиротехнические и химические, с самовоспламеняющимися компонентами [19]. Использование для воспламенения широко распространенных электроискровых свечей требует решения целого ряда задач. Большинство существующих и серийно изготавливаемых электроискровых свечей имеют ограничения по давлению воспламеняемой среды, что является следствием увеличения необходи-

мого напряжения на электродах в соответствии с законом Ф. Пашена [20]. Поэтому при давлениях выше ~ 10 бар существенно снижается надежность и повторяемость воспламенения ПГ в воздушном потоке посредством электроискрового разряда. Кроме того, как показала практика, работоспособность таких свечей в рассматриваемых условиях ухудшается при накоплении на электродах сажи. Это приводит к снижению ресурса работы свечи и необходимости сокращения периода между техническими обслуживаниями систем воспламенения.

Плазменные системы воспламенения основаны на локальном электродуговом разогреве до высоких температур инертного или активного вспомогательного газа, который затем инжектируется в основной поток, где он обеспечивает воспламенение компонентов топлива [12, 13]. Плазменный нагрев газа сопровождается значительными энергозатратами и требует наличия специальных устройств для создания электрической дуги. Так же как и для электроискровых устройств, с повышением давления газа выше 10 бар использование плазменных систем воспламенения становится весьма проблематичным. Плазменные системы воспламенения требуют достаточно частой замены электродов вследствие их эрозии. Вышеперечисленные причины ограничивают применение существующих конструкций плазменных систем воспламенения для ГВВП многократного срабатывания.

Газодинамические системы воспламенения основаны на использовании части кинетической энергии струи, подаваемой для нагрева газа в застойной области резонатора гартмановского типа [14]. Такие системы достаточно хорошо себя зарекомендовали для воспламенения водорода в паре с кислородом или воздухом, смесей на основе оксида азота, а также метана с кислородом [15, 21, 22]. Однако организовать стабильное воспламенение ПГ с воздухом оказывается достаточно сложно вследствие низкой скорости распространения фронта пламени в такой смеси [23]. Отметим также, что высокие тепловые и вибрационные нагрузки, воздействующие на резонатор, в некоторых случаях могут приводить к его разрушению [24].

Одним из перспективных направлений является реализация системы лазерного воспламенения топливных смесей. Анализ показал эффективность применения лазерного воспламенения для аэрокосмической техники [17]. Однако на данный момент такие системы требуют тонкой настройки работы лазера, оптико-электронных и оптических интерфейсов [17, 18]. Также лазерные системы чувствительны к условиям эксплуатации, в том числе к внешней температуре, дав-

лению, вибрациям, химической чистоте и соотношению содержаний компонентов топлива. В связи с этим на данный момент использование существующих лазерных систем многократного воспламенения для стендовых ГВВП представляется нецелесообразным.

В дополнение отметим, что использование пиротехнических систем не обеспечивает надлежащей многократности инициирования горения, а в химических системах воспламенения обычно используются токсичные компоненты топлива. В силу этого пиротехнические и химические системы воспламенения не находят широкого применения для технологических и стендовых ГВВП, а их использование ограничено специальными задачами.

Для применения в стендовых ГВВП могут быть рассмотрены системы воспламенения на основе СВЧ-разряда [25–27]. В случае надлежащего исполнения такие системы лишены большинства перечисленных недостатков, однако их внедрение требует достаточно подробного исследования и подтверждения работоспособности во всем диапазоне возможных режимов эксплуатации. В связи с этим целью настоящей работы является экспериментальное исследование системы воспламенения на основе СВЧ-разряда для инициирования горения ПГ в воздушно-кислородной смеси при условиях, характерных для эксплуатации стендовых ГВВП.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И КОНСТРУКЦИЯ СВЧ-ВОСПЛАМЕНИТЕЛЯ

Устройство воспламенения с инициированием зажигания на основе СВЧ-разряда показано на рис. 1 (далее СВЧ-воспламенитель).

СВЧ-воспламенитель, схема которого изображена на рис. 2, содержит соосные внешний 3 и внутренний 4 электроды. Между электродами образуется канал 5 для транспортировки СВЧ-излучения от антенны 2 магнетрона 1 в направлении зоны воспламенения топливной смеси. В канале размещается диэлектрическая вставка 7, выполненная в форме шайбы, которая изготовлена из материала с малыми потерями на рабочей частоте генератора. Электроды СВЧ-воспламенителя выведены в камеру сгорания 8 диаметром $d_{\text{фк}}$, в которую тангенциально через камеру смещения 6 подаются окислитель (воздух) и горючее (газообразный ПГ) [28]. Камера сгорания СВЧ-воспламенителя сообщается с камерой сгорания энергосиловой установки через участок 9 с выходным отверстием диаметром $d_{\text{вых}}$ и переходит в цилиндрический канал постоянного сечения.

При включении источника СВЧ-излучения по каналу, образованному внешним и внутренним

электродами, распространяется волна электромагнитного излучения в направлении от источника к зоне воспламенения. Если мощность источника достаточна для электрического пробоя между внешним и внутренним электродами свечи, то в ее межэлектродном зазоре создается плазма, которая нагревается в результате поглощения излучения и инжектируется в камеру сгорания СВЧ-воспламенителя, куда подаются окислитель и горючее. Высокотемпературная плазма с ионизированными молекулами газа служит инициатором воспламенения. Кроме того, создаваемая плазма является источником ультрафиолетового излучения, которое может способствовать распространению фронта пламени в результате фотодиссоциации молекул реакционной смеси [29].

Преимуществами рассматриваемого СВЧ-воспламенителя являются большая длительность импульса (более 8 мс), высокий КПД преобразования энергопотребления в мощность СВЧ-разряда (около 60%), высокий ресурс работы на максимальной мощности (более нескольких часов), возможность управления работой магнетрона и соответствующей регулировки энерговыклада. Относительно невысокое рабочее напряжение магнетрона (4 кВ) существенно снижает риск возникновения электрических высоковольтных пробоев и практически не создает дополнительных трудностей в обеспечении электромагнитной совместимости различных стендовых систем.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРИ ВЫСОКОЙ СТЕПЕНИ ЗАКРУТКИ

Математическое моделирование рабочего процесса СВЧ-воспламенителя в вихревой камере сгорания (КС) производилось с целью пояснения и визуализации внутренней структуры течения, скрытой от наблюдения в ходе проведения эксперимента. Также моделирование выполняется для определения моделей, описывающих турбулентность и горение, при использова-

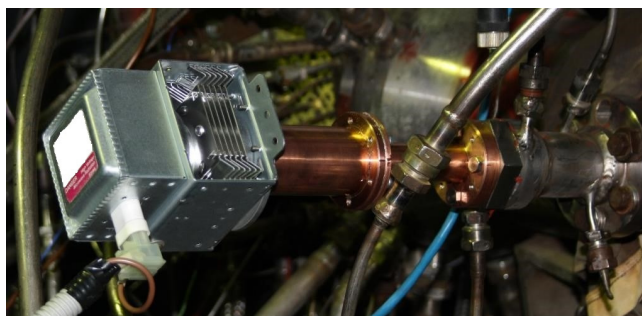


Рис. 1. Фотография СВЧ-воспламенителя с магнетроном.

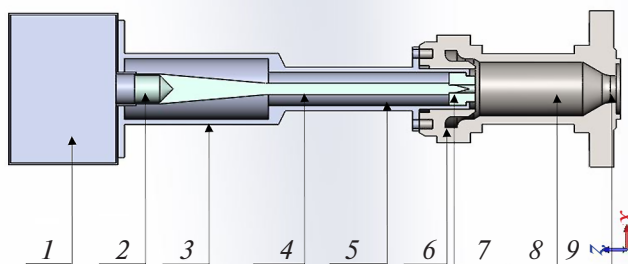


Рис. 2. Схема СВЧ-воспламенителя: 1 – магнетрон, 2 – антенна магнетрона, 3 – внешний электрод, 4 – внутренний электрод, 5 – канал для транспортировки СВЧ-излучения, 6 – камера смешения окислителя и горючего, 7 – диэлектрическая вставка, 8 – камера сгорания СВЧ-воспламенителя, 9 – канал для транспортировки горячих продуктов сгорания.

нии которых результаты расчетного исследования совпадают с результатами испытаний.

Рассмотрим далее основной объект моделирования – вихревую КС, длиной a и диаметром выхода b . Компоненты топлива (газообразный ПГ и воздух) поступают через две трубки с внутренними диаметрами d_t в камеру смешения. Трубки подвода компонентов располагаются тангенциально на расстоянии c . В полости подводов установлены жиклеры (рис. 3).

Расчет течения в вихревой камере сгорания СВЧ-воспламенителя проводился с помо-

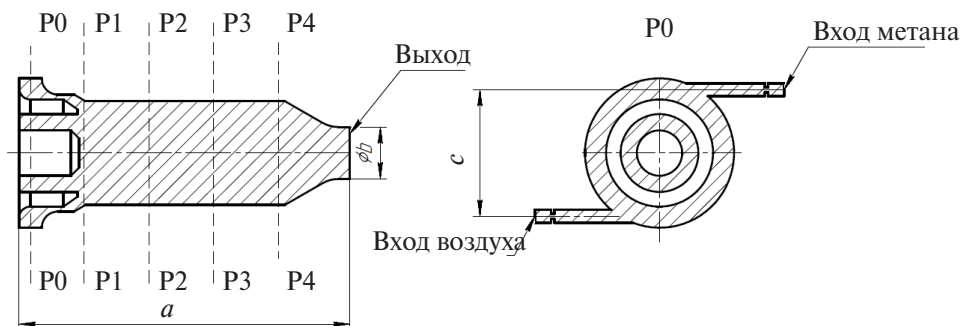


Рис. 3. Расчетная схема модельной вихревой камеры сгорания.

стью готовых коммерческих программных продуктов в две стадии: «холодный» расчет (без горения ПГ) и «горячий» расчет (с горением ПГ). «Холодный» расчет проводился для определения степени закрутки потока в характерных сечениях (рис. 3) и статического давления в характерном сечении замера вихревой камеры сгорания (сечение РЗ на рис. 3), а также для оценки гидравлических потерь и импульса, создаваемого «холодным» потоком при заданных массовых расходах компонентов топлива. Граничные условия в виде массовых расходов ПГ и воздуха задавались в соответствии с результатами экспериментов. Конечно-объемная модель вихревой камеры сгорания представлена на рис. 4. Она включала в себя 392508 элементов, тип элементов – додекаэдр.

Моделирование «холодного» течения с высокой начальной закруткой основывалось на решении системы уравнений сохранения массы, импульса и энергии, которые дополнялись уравнением состояния идеального газа и полной моделью турбулентности напряжений Рейнольдса:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} &= 0, \\ \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} &= \\ &= \frac{\partial}{\partial t} \left(-p \delta_{ij} + \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial k}{\partial x_n} \delta_{ij} \right] \right) + \\ &+ \rho \sum_{n=1}^N (Y_n f_n)_i, \\ \rho \frac{\partial e_t}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial e_t}{\partial x_i} &= \\ &= - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \left(-p \delta_{ij} + \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial k}{\partial x_n} \delta_{ij} \right] u_i \right)}{\partial x_j} + \\ &+ \rho \sum_{n=1}^N Y_n f_{n,i} u_{i,n}, \\ \rho \frac{\partial Y_n}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial Y_n}{\partial x_i} &= - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D_n \frac{\partial Y_n}{\partial x_i} \right) + \dot{m}_n. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь i, j – индексы, принимающие последовательно значения координат; n – индекс, принимающий значение компонента смеси от 1 до N ; ρ – плотность; p – давление; u – скорость; t – время; δ_{ij} – символ Кронекера ($i=j \rightarrow \delta_{ij}=1$, $i \neq j \rightarrow \delta_{ij}=0$); Y – массовая доля компонента смеси; μ – коэффициент динамической вязкости;

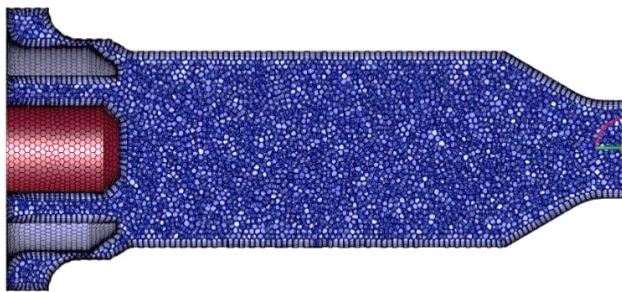
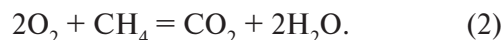


Рис. 4. Конечно-объемная модель вихревой КС.

$f_{n,i}$ – внешняя сила, действующая на единицу массы n -го компонента в направлении i ; e_t – полная энергия; $\dot{m}_n$ – скорость изменения массы n -го компонента в результате химических реакций; D – коэффициент диффузии; q – плотность теплового потока.

Система уравнений (1) дополнялась уравнением горения ПГ в кислороде воздушного потока. Горение моделировалось одной брутто-реакции



Скорость реакции определяется моделью, основанной на концепции рассеивания вихрей [30]. Скорость появления i -го вещества

$$R_i = \frac{\rho (\xi^*)^2}{\tau^* [1 - (\xi^*)^3]} (Y_i^* - Y_i),$$

где $\xi^* = C_\xi \left(\frac{\nu \epsilon}{k^2} \right)^{0.25}$ – длина тонких струй;

$\tau^* = C_\tau \left(\frac{\nu}{\epsilon} \right)^{0.5}$ – время реакции в тонких струях;

я; $C_\xi = 2.1377$ – константа объемной фракции; $C_\tau = 0.4082$ – константа масштаба времени; k – кинетическая энергия турбулентности; ϵ – скорость диссипации турбулентной энергии; ν – кинетическая вязкость; Y_i – массовая доля компонента i в ячейке; Y_i^* – массовая доля компонента i в тонких струях, рассчитанная как результат реакции, произошедшей за время τ^* в химическом реакторе с постоянным давлением, константа скорости которой определяется уравнением

$$k_r = A e^{\frac{-E_{\text{акт}}}{RT}},$$

где $A = 2.119 \times 10^{11}$ – предэкспоненциальный множитель, $E_{\text{акт}} = 2.027 \times 10^8$ – энергия активации реакции (2), Дж/моль.

Граничные условия (ГУ) применительно к геометрии вихревой КС представлены на рис. 3. На входе в трубку подачи горючего задавался массовый расход – 0.0009 кг/с, температура –

300 К. На входе в трубку подачи воздуха аналогично задавался массовый расход — 0.0160 кг/с и температура — 300 К. На выходе давление принималось равным 1 бар. Стенки камеры адиабатические.

Как было показано в работах [31, 32], начальная закрутка потоков окислителя и горючего оказывает влияние на размеры, форму и устойчивость пламени. Интенсивность закрутки потока определяется выражением [33]

$$S = \frac{G_\theta}{0.5dG_x},$$

где G_θ — поток момента импульса в осевом направлении, G_x — поток импульса в осевом направлении, d — диаметр канала в выбранном сечении, которые определялись без учета турбулентных напряжений и вклада давления при высоких степенях закрутки с помощью зависимостей

$$G_\theta = \frac{\pi}{2} \rho u_{m0} w_{m0} (0.5d)^3, \quad (3)$$

$$G_x = \frac{\pi}{2} \rho u_{m0}^2 (0.5d)^2 [1 - (0.5G)^2], \quad (4)$$

где G — отношение скоростей

$$G = \frac{w_{m0}}{u_{m0}}.$$

Здесь w_{m0} , u_{m0} — максимальные окружная и осевая скорости в выходном сечении сопла соответственно.

С учетом выражений (3) и (4) уравнение для параметра закрутки принимает следующий вид:

$$S = \frac{0.5G}{1 - 0.5G}.$$

На рис. 5 представлены результаты «холодного» расчета, выполненного при заданных ГУ. Полная температура потока не превышала 300 К при отсутствии химических реакций. Из распределения числа Маха видно, что скорость в минимальном сечении дозвуковая и соответствует числу Маха $M \approx 0.3$ – 0.4 , а у стенки достигает $M \approx 0.5$ – 0.6 (рис. 6а) за счет закрутки (окружной составляющей скорости). Среднее значение статического давления перед входом в сужающуюся часть (в сечении Р4) составило ~ 2.3 бар (рис. 6б) при отсутствии горения.

На рис. 6 представлены результаты расчета с горением ПГ в воздушном потоке. Средние температуры на стенках камеры сгорания и сопла составили 338 и 450 К соответственно при температуре в ядре потока ≈ 2140 К (рис. 6а). При локальном коэффициенте избытка окислителя $\alpha \approx 1$ температура продуктов сгорания, определенная в результате термодинамического расчета в Терра [34], составила 2371 К. После смешения

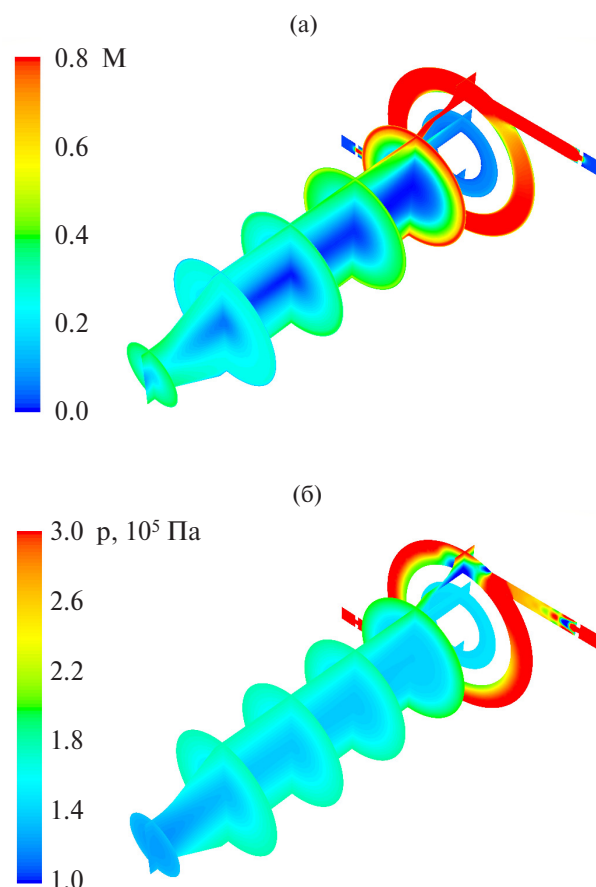


Рис. 5. Результаты расчета без горения ПГ: (а) — распределение чисел Маха, (б) — распределение статического давления.

компонентов топлива происходит горение с повышением температуры продуктов сгорания в ядре потока. В ядре потока реализуется избыток ПГ ($\alpha \approx 0.8$), обеспечивающий воспламенение и последующее стабильное горение. Параметры закрутки потока в конце камеры сгорания (сечение Р4) имели значения $G_4 = 1$ и $S_4 = 1$, при этом скорость в конце канала оставалась дозвуковой (рис. 6а). Статическое давление в КС в сечении Р4 составило ≈ 4.3 бар при горении.

Расчетные исследования позволили выбрать конфигурацию системы подвода компонентов, обеспечивающую закрутку потоков воздуха и ПГ по всей длине вихревой камеры. За счет такой закрутки потоков удалось добиться эффекта низкотемпературного пристеночного слоя у стенок канала вихревой КС. Полученный эффект достигается за счет интенсивной закрутки потока воздуха у стенок канала в сечении Р1, процесс горения у стенок КС при этом не реализуется (рис. 6б). Предпламенный процесс осуществляется в сечении Р1. Из-за высокого градиента давления вдоль

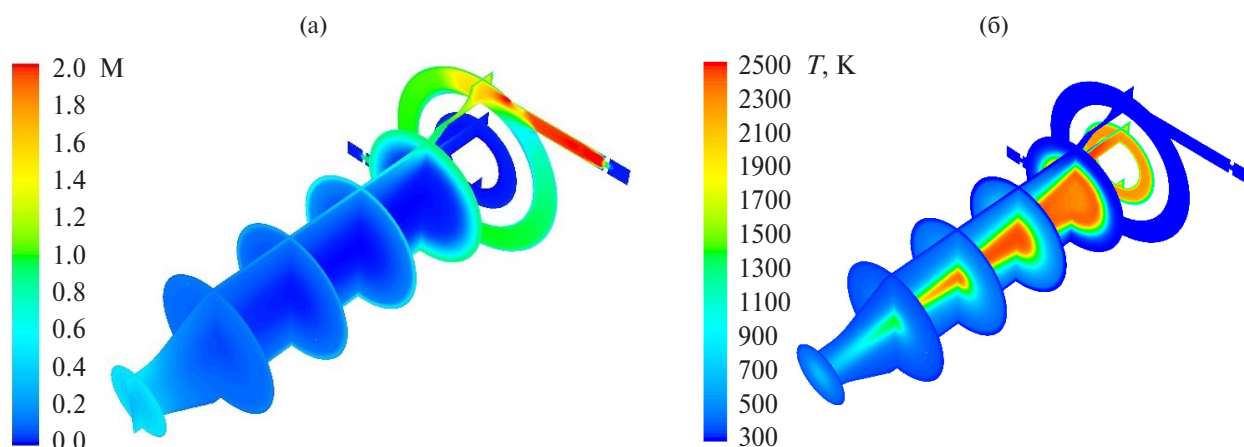


Рис. 6. Результаты расчета с горением воздух + ПГ: (а) – распределение чисел Маха, (б) – распределение статической температуры.

радиуса, реализуемого при интенсивной закрутке потока воздуха и топливоздушной смеси, массообменный процесс между приосевой зоной реакций и пристеночной «холодной» зоной на длине от сечения P0 до сечения P3 практически отсутствует. Это обеспечивает интенсивное охлаждение стенок цилиндрического канала при локализации предпламенного процесса горения в приосевой зоне (рис. 6б). После истечения топливоздушной смеси и продуктов неполного сгорания в сечении P3 закрутка потока резко снижается (относительно сечений P1 и P2). При этом реализуется турбулентный массообмен между приосевым слоем предпламенного процесса и периферийным слоем топливоздушной смеси с интенсивным догоранием последней в сече-

нии P4 (рис. 7). При этом интенсификация смешения при меньшей степени закрутки объясняется снижением плотностной сепарации газа, которая пропорциональна центробежным силам и квадрату окружной скорости.

Таким образом, расчеты позволили подтвердить выбранную конфигурацию систем подачи воздуха и ПГ в вихревую камеру, которые обеспечивают низкотемпературный пристеночный слой. Это дало возможность отказаться от организации системы водяного охлаждения вихревой камеры сгорания и упростило конструкцию объекта исследования. При этом в ядре потока соотношение компонентов и уровень температур соответствует условиям воспламенения и стабильного горения.

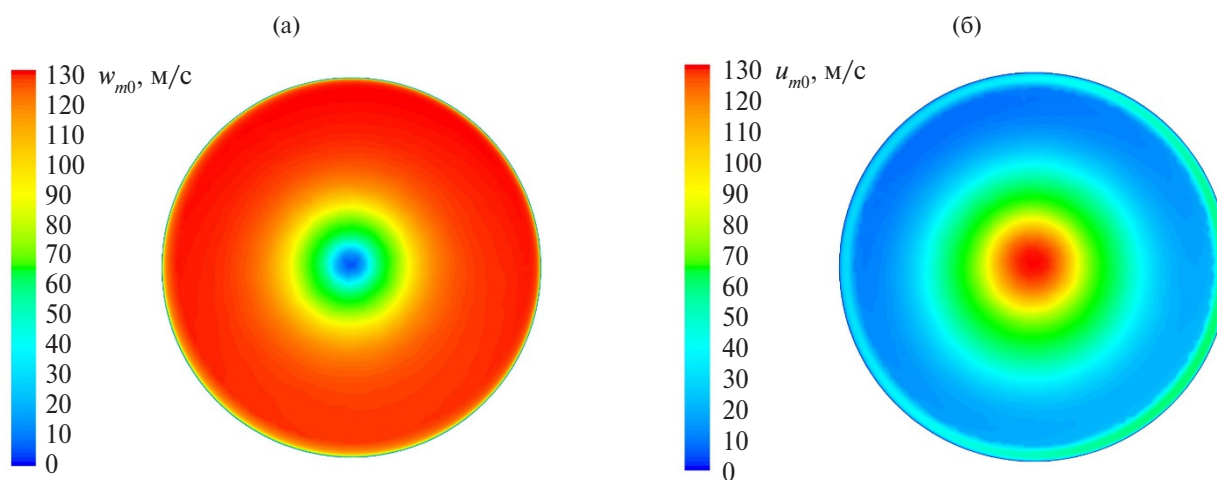


Рис. 7. Распределения скоростей потока в сечении P4 вихревой КС: (а) – окружная скорость w_{m0} , (б) – осевая скорость u_{m0} .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ СВЧ-ВОСПЛАМЕНИТЕЛЯ С ВИХРЕВОЙ КС

Задачей автономной отработки СВЧ-воспламенителя являлись подтверждение возникновения устойчивого плазменного «факела» и оценка его характеристик. В работе использована СВЧ-свеча с рабочей частотой магнетрона 2,45 ГГц. Под СВЧ-свечой понимается конструкция (рис. 2), состоящая из: магнетрона 1, антенны магнетрона 2, внешнего электрода 3, внутреннего электрода 4, канала для транспортировки СВЧ-излучения 5. Поскольку время релаксации плазмы от каждого электромагнитного воздействия превышает период времени наступления следующего импульса на несколько порядков, происходит накопление плазменного облака, которое вытесняется из разрядного промежутка в окружающее пространство в виде факела. Время существования факела определяется длительностью импульса. Видимый факел плазмы имеет протяженность около 60 мм и диаметр ~25 мм (рис. 8). Регистрация формирования разряда и распространения плазмы осуществлялась высокоскоростной видеосъемкой с помощью видеокамеры Evercam с объективом F50 Fastcam и объективом F35 (светосила обоих объективов – 1.2), разрешение – 320×256 , экспозиция – $1/10000$, 2000 кадр/с.

Длительность существования плазмы определяется длительностью импульса модуляции, которую можно изменять в пределах от 8 до 200 мс. Энерговклад при этом зависит от длительности импульса. При автономных испытаниях была выбрана длительность рабочего импульса 70 мс, длительность периода – 350 мс. Потребляемая мощность от сети составляет 200 Вт, напряжение питания СВЧ-свечи – 4 кВ. При подаче переменного напряжения от сети 220 В на агрегат зажигания через 4–5 с на головной части СВЧ-свечи

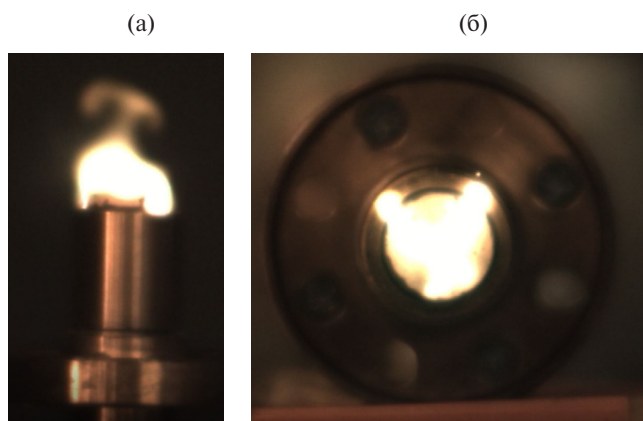


Рис. 8. Фотографии плазменного факела СВЧ-воспламенителя: (а) – вид сбоку, (б) – вид сверху.

появляются факелы плазмы (рис. 9а). Предварительно при отработке работоспособности СВЧ-свечи в составе с воспламенителем проводились автономные испытания воспламенителя. Последовательность запуска воспламенителя следующая: 1) в камеру сгорания СВЧ-воспламенителя тангенциально подаются раздельно воздух и ПГ в соотношении, близком к стехиометрическому; 2) через секунду включается СВЧ-свеча; 3) воспламенитель запускается и работает в заданном режиме; 4) выключается СВЧ-свеча; 5) прекращается подача воздуха и ПГ в камеру сгорания СВЧ-воспламенителя. При визуальном контроле при первом включении СВЧ-свечи наблюдался факел светящихся продуктов сгорания, истекающих из канала воспламенителя. При выключении свечи факел воспламенителя продолжал гореть в устойчивом режиме (рис. 9б). Включение СВЧ-свечи при работающем воспламенителе заметно увеличивало светимость факела (рис. 9в). Это обусловлено дополнительным энергоподводом и смещением граничных пределов горения топливовоздушной смеси, неоднородной по про-

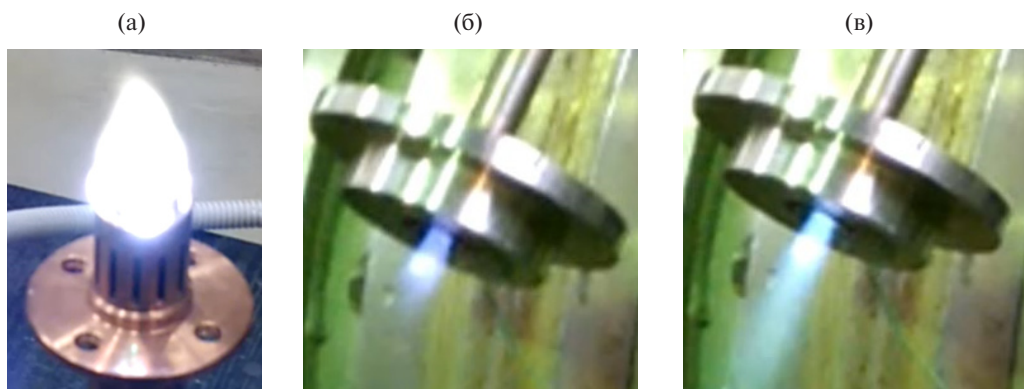


Рис. 9. Результаты автономных испытаний СВЧ-воспламенителя: (а) – появление факелов плазмы, (б) – горение при выключенной свече, (в) – горение при включенной свече.

Результаты испытаний

m_0 , кг/с	m_r , кг/с	K_m	α	p_{k1} , бар	p_{k2} , бар
0.01604	0.00092	17.48	1.01	2.4	4.5
0.02424	0.00145	16.74	0.97	3.5	5.4
0.01025	0.00059	17.44	1.01	2.2	4.0
0.01918	0.00118	16.31	0.95	4.3	7.8
0.03606	0.00211	17.11	0.99	5.8	10.3
0.03425	0.00146	23.42	1.36	7.5	12.4
0.06043	0.00358	16.86	0.98	10.1	14.6

Примечание. m_0 — массовый расход воздуха, m_r — массовый расход метана, K_m — соотношение компонентов, α — коэффициент избытка окислителя, p_{k1} — давление в камере сгорания СВЧ-воспламенителя до воспламенения, p_{k2} — давление в камере сгорания СВЧ-воспламенителя после воспламенения.

центному содержанию топлива вследствие повышенной ионизации.

Результаты испытаний в составе с модельным ГВВП приведены в таблице. Для подтверждения возможности стабильного и безаварийного иницирования рабочего процесса с горением топливовоздушной смеси в КС с помощью СВЧ-разряда использовался модельный ГВВП с двумя установленными воспламенителями.

Измерение давления в камере сгорания СВЧ-воспламенителя до и после СВЧ-воздействия показало, что давление повышается в среднем в 1.7 раза, что в свою очередь свидетельствует об иницировании процесса горения.

Результаты испытаний также подтвердили возможность стабильного иницирования горения СВЧ-воспламенителем при $\alpha = 0.95$ –1.36 в камере сгорания в условиях протекания рабочего процесса в модельном ГВВП. Экспериментально подтверждено, что свеча на основе СВЧ-разряда обеспечивает стабильный подвод энергии к топливовоздушной смеси. По результатам испытаний можно отметить стабильное и систематически повторяющееся иницирование горения ПГ в воздушном потоке в диапазоне изменения давления в вихревой КС воспламенителя от 2.4 до 10.1 бар при коэффициентах избытка окислителя α от 0.95 до 1.36.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована конфигурация СВЧ-воспламенителя с высокой степенью закрутки ($S \approx 1$) компонентов топлива (воздуха и ПГ), которая позволила достичь образования низкотемпературного пристеночного слоя по всей длине камеры сгорания СВЧ-воспламенителя при температуре в «ядре» потока до 2300 К, что обеспечило устойчивую работу СВЧ-воспламенителя без дополнительного водяного охлаждения.

Экспериментальные исследования иницирования горения ПГ в воздушном потоке в диа-

пазоне изменения давления в вихревой КС воспламенителя от 2.4 до 10.1 бар при коэффициентах избытка окислителя α от 0.95 до 1.36 показали устойчивое воспламенение компонентов топлива при энергоподводе до 200 Вт с частотой магнетрона 2.45 ГГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ягодников Д.А. Актуальные проблемы ракетного двигателестроения. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 196 с.
2. Григорьева О.К., Боруш О.В. Общая энергетика. Энергетические установки. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. 96 с.
3. Koytsoumpa E.I., Bergins C., Buddenberg T., Wu S., Sigurbjörnsson O., Tran K., Kakaras E. The Challenge of Energy Storage in Europe: Focus on Power to Fuel // J. Energy Res. Technol. 2016. V. 138. № 4. 042002.
4. Дегтярь В.Г., Сон Э.Е. Гиперзвуковые летательные аппараты. Т. 1. М.: Янус-К, 2018. 984 с.
5. Кулагин В.В., Бочкарев С.К., Горюнов И.М. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок. М.: Машиностроение, 2005. 464 с.
6. Александров В.Ю., Мосеев Д.С. Сравнение способов имитации условий полета на стендах с огнем подогревом // ФГВ. 2014. № 2. С. 24.
7. Александров В.Ю., Арефьев К.Ю., Ильченко М.А., Ананян М.В. Исследование эффективности рабочего процесса в малогабаритных генераторах высокоэнтальпийного воздушного потока // Электр. науч. изд. «Наука и образование». 2015. № 8. С. 75.
8. Тропин Д.А., Федоров А.В., Пенязьков О.Г., Лещевич В.В. Время задержки воспламенения метано-воздушной смеси в присутствии частиц железа // ФГВ. 2014. № 6. С. 11.
9. Трошин К.Я., Никитин А.В., Борисов А.А., Арутюнов В.С. Определение задержек самовоспламенения метановоздушных смесей с добавками алканов C_2 – C_5 // Горение и взрыв. 2016. Т. 9. № 2. С. 23.

10. Гизатуллин Ф.А. К теории искрового воспламенения топливовоздушных смесей в ГТД // *Авиационная промышленность*. 2000. № 1. С. 67.
11. Гизатуллин Ф.А., Валиуллина З.Г. Моделирование разрядных процессов в емкостной системе зажигания с однополярным импульсом // *Вестн. УГАТУ*. 2009. № 2. С. 126.
12. Фирсов А.А., Долгов Е.В., Леонов С.Б. Оптимизация плазменной системы воспламенения этилена в сверхзвуковом потоке // *Вестн. ОИВТ РАН*. 2018. Т. 1. № 1. С. 13.
13. Перегудов В.С. Оптимизация процесса плазменного воспламенения углей // *ТВТ*. 2009. Т. 47. № 2. С. 200.
14. Сергиенко А.А., Семенов В.В. Газодинамический воспламенитель // *Изв. вузов. Авиационная техника*. 2000. № 2. С. 44.
15. Александров В.Ю., Арефьев К.Ю., Ильченко М.А. Расчетно-экспериментальные исследования пульсационных процессов в малогабаритных генераторах высокоэнтальпийного потока с газодинамической системой воспламенения // *Изв. РАН. Энергетика*. 2014. № 6. С. 96.
16. Гидаснов В.Ю., Кононов Д.С., Северина Н.С. Моделирование воспламенения и детонации метано-воздушных смесей за отраженной ударной волной // *ТВТ*. 2020. Т. 58. № 6. С. 909.
17. Ребров С.Г., Голубев В.А., Голиков А.Н. Лазерное зажигание кислородно-углеводородных топлив в ракетных двигателях // *Изв. вузов. Машиностроение*. 2018. № 7. С. 77.
18. Цейтлин Д.А., Ребров С.Г., Болотин Н.Б. Устройство для лазерного воспламенения топлива в камере сгорания жидкостного ракетного двигателя. Патент на изобретение РФ № 2533262. Кл. МПК: F02K 9/95. 2014.
19. Нигодюк В.Е., Сулинов А.В. Исследование особенностей рабочего процесса жидкостных ракетных двигателей малой тяги на самовоспламеняющихся компонентах топлива тягой менее 1 Н // *Вестн. Самарск. ун-та. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2016. Т. 15. № 4. С. 114.
20. Энциклопедия низкотемпературной плазмы / Под ред. Фортова В.Е. М.: Наука, 2000. 576 с.
21. Арефьев К.Ю., Воронецкий А.В., Ильченко М.А. Исследование динамических характеристик резонансной газодинамической системы воспламенения топливной смеси // *ФГВ*. 2013. № 6. С. 41.
22. Воронецкий А.В., Арефьев К.Ю., Ильченко М.А. Экспериментальные исследования характеристик газодинамической системы воспламенения топливной смеси применительно к ЖРД малой тяги // *Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. 2012. № 7. С. 4.
23. Антонов А.Н., Купцов В.М., Комаров В.В. Пульсации давления при струйных и отрывных течениях. М.: Машиностроение, 1990. 272 с.
24. Александров В.Ю., Арефьев К.Ю., Ильченко М.А. Экспериментальное исследование влияния не прогнозируемого изменения формы передней кромки резонатора на работоспособность газодинамической системы воспламенения // *Изв. вузов. Машиностроение*. 2017. № 3. С. 56.
25. Егоров Ю.М., Лагутин В.Г., Маевский В.А., Смилга В.И. Свеча зажигания на основе СВЧ-разряда. Патент на полезную модель РФ № 153582. Кл. МПК: F02P 23/00 (2006.01). 2015.
26. Ikeda Yu. Development of 2.45 ghz Semiconductor Microwave System for Combustion Ignition Enhancement and Failure Analysis // *Materials*. 2022. V. 1. № 6. 2042.
27. Ikeda Yu., Ofosu J.A. Schlieren Imaging and Spectroscopic Approximation of the Rotational-Vibrational Temperatures of a Microwave Discharge Igniter with a Resonating Cavity // *Appl. Opt.* 2022. V. 6. № 36. 10707.
28. Свердлов Е.Д., Марков Ф.Г., Лошенкова Н.С. Способ сжигания топлива и устройство для его реализации. Патент на изобретение РФ № 2193139. Кл. МПК: F 23 C 11/00. F 23 L 7/00. 2002.
29. Беликов А.К., Максименко А.В., Никитин И.С., Бегишев И.Р. Воспламенение и распространение пламени в смесях хлористого этила с хлором под действием ультрафиолетового излучения // *Технологии технической безопасности*. 2009. № 5. С. 1.
30. Magnussen B.F., Hjertager B.H. On Mathematical Models of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion // *Symposium on Combustion*. 1977. V. 16. P. 719.
31. Shynkarenko O., Simone D. Oxygen-Methane Torch Ignition System for Aerospace Applications // *Aerospace*. 2020. V. 7. № 8. P. 114.
32. Shi B., Chu Q., Chen R. Effects of Damköhler Number on Methane/Oxygen Tubular Combustion Diluted by N₂ and CO₂ // *J. Energy Res. Technol.* 2016. V. 139. № 1. 012206.
33. Гунта А. Закрученные потоки. М.: Мир, 1987. 588 с.
34. Трусов Б.Г. Программная система моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2012. № 1. С. 21.