

УДК 536.46

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ САЖЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ГОРЕНИИ ПЕРЕОБОГАЩЕННОЙ КИСЛОРОД-МЕТАНОВОЙ СМЕСИ

© 2022 г. Д. А. Ягодников*, О. А. Ворожеева**, А. О. Новиков

ФГБОУ ВО “Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)”, Москва, Россия

*E-mail: daj@bmstu.ru

**E-mail: oa-vorozheeva@bmstu.ru

Поступила в редакцию 19.04.2021 г.

После доработки 26.07.2021 г.

Принята к публикации 28.09.2021 г.

Представлены описания экспериментального оборудования, систем измерения и регистрации, методики проведения экспериментальных исследований особенностей сажеобразования при горении переобогащенной кислород-метановой смеси в двухзонном модельном газогенераторе при соотношении долей компонентов в диапазоне 0.4–1.0. С использованием визуализации внутрикамерного процесса во второй зоне газогенератора с помощью цветной цифровой видеосъемки и регистрации интенсивности излучения продуктов сгорания посредством фотосопротивления определены условия, при которых реализуется сажеобразование.

DOI: 10.31857/S0040364422050167

ВВЕДЕНИЕ

Расширение сферы использования космического пространства (навигация, связь, изучение ресурсов Земли, промышленность, разведка, телевидение, астрономия, метеорология, фармацевтика, медицина) предполагает применение ракет-носителей разных классов, не наносящих ущерба экологии околоземного пространства, а также пригодных к многоразовому использованию. При этом ключевым звеном является разработка жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), в частности кислородно-метанового ЖРД. Метан обладает в рассматриваемом аспекте рядом важных преимуществ перед традиционным керосином, в частности:

- возможностью создания замкнутой схемы ЖРД с восстановительным газогенератором;
- более высокими энергетическими характеристиками ракет (на 20–30% большая масса полезного груза при одинаковой массе ракеты);
- лучшими охлаждающими свойствами;
- более низкой стоимостью (втрое меньше, чем у керосина).

Вопросами разработки ЖРД на сжиженном природном газе занимаются конструкторские бюро: АО “КБХиммаш им. А.М. Исаева” [1], АО “Конструкторское Бюро Химавтоматики” [2], НПО “Энергомаш” им. акад. В.П. Глушко [3], НИИМашиностроения (Россия), корпорации США, Кореи, Японии [4]. Экспериментально-

теоретическими исследованиями, выполненными на перечисленных предприятиях, продемонстрирована принципиальная возможность организации устойчивого рабочего процесса и достижения высоких значений действительного (полученного в процессе огневых стендовых испытаний) удельного импульса. Тем не менее один из принципиальных вопросов, связанный с образованием сажи в условиях, соответствующих параметрам рабочего процесса в газогенераторе с избытком горючего, до настоящего времени детально не изучен. Актуальность проблемы образования сажи обусловлена обоснованием реализуемости разработки метанового ЖРД с дожиганием восстановительного генераторного газа, который при прочих равных условиях является более безопасным, чем ЖРД с дожиганием окислительного генераторного газа.

Вопросам образования сажи и нанодисперсных частиц углерода посвящены исследования переобогащенных углеводородных пламен, выполненные на лабораторных установках [5–10]. Теоретические исследования связаны с проведением термодинамических расчетов равновесного состава продуктов сгорания метана в кислороде применительно к условиям, характерным для камеры сгорания ЖРД. Так, в работе [5] с использованием программного комплекса TEPRA [11] проведены расчетные исследования по определению концентрационных пределов появления конден-

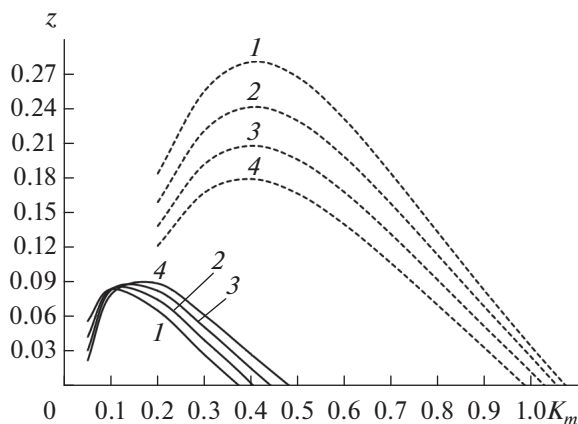


Рис. 1. Зависимости относительной массовой концентрации сажи в продуктах сгорания от массового соотношения компонентов при давлении: 1 – 0.10 МПа, 2 – 0.35, 3 – 1.00, 4 – 2.5; штриховые линии – однозонная равновесная модель, сплошные – двухзонная неравновесная модель.

сированной фазы в виде сажи в продуктах сгорания переобогащенной кислород-метановой смеси. Как следует из рис. 1 (штриховые линии), сажа в продуктах сгорания в предположении термодинамического равновесия (однозонная модель) образуется при значениях массового соотношения компонентов $K_m < 1.1$. Максимум концентрации наблюдается в области $K_m \approx 0.4$. Причем с ростом давления сужаются концентрационные пределы образования сажи, а также ее относительная массовая концентрация z .

При использовании двухзонной модели термодинамический расчет в первой зоне ($K_m = 2$) проводился при условии равновесного протекания химических реакций. Расчетное значение температуры при этом составило 2615–2730 К при наличии в продуктах сгорания только газообразных компонентов.

Во второй зоне моделировалась химическая неравновесность по отношению к метану с использованием предположения, что подаваемый во вторую зону метан как избыточный компонент не проявляет химической активности и его массовое содержание фиксировано (“заморожено”). При этом химическое взаимодействие других компонентов продуктов сгорания, поступающих из первой зоны, моделировалось равновесной моделью. Сажа в продуктах сгорания для двухзонной модели образуется при меньших значениях K_m (< 0.5), и относительная массовая концентрация сажи уменьшается по сравнению с однозонной равновесной моделью в 2–3 раза (рис. 1). Максимум концентрации наблюдается при $K_m \approx 0.1–0.18$ и сдвигается в сторону стехиометрии с ростом давления. Кроме того, рост давления приводит в большему выходу конденсированной фазы в виде

сажи, что согласуется с опубликованными в работах [12, 13] результатами.

Таким образом, термодинамические расчеты с использованием двухзонной модели, результаты которых приведены на рис. 1, подтверждают экспериментальные данные [12, 13] по неоднозначному влиянию давления на выход сажи, в общем случае зависящий от условий протекания процесса (окисление или пиролиз), состава углеводородного горючего, температуры, концентрации атомов углерода в исходной смеси. Выход сажи может увеличиваться, уменьшаться или оставаться практически постоянным.

Важно заметить, что данный диапазон значений K_m предпочтителен для схем ЖРД с дожиганием восстановительного (работающего с избытком горючего) генераторного газа, однако наличие к-фазы (сажи) может привести к снижению эффективности и надежности ЖРД вследствие возникновения двухфазных потерь и эрозионно-го разрушения элементов конструкции.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование особенностей рабочего процесса в модельном газогенераторе на кислороде и метане для определения концентрационных условий образования в продуктах сгорания сажи.

ОПИСАНИЕ СТЕНДОВОЙ УСТАНОВКИ

Для достижения поставленной цели разработаны модельный газогенератор на кислороде и метане, методика проведения огневых испытаний, а также следующие системы, обеспечивающие функционирование модельной установки:

- 1) подачи окислителя и горючего;
- 2) управления газогенератором и установкой с устройством запуска, останова и оперативного управления;
- 3) визуального контроля и видеорегистрации;
- 4) измерений с применением первичных преобразователей, линий связи и регистрирующей аппаратуры.

Состав и размещение первичных измерительных преобразователей на магистралях пневмогидравлической системы представлены на рис. 2.

Система подачи окислителя в камеру газогенератора. В качестве окислителя газогенератора используется газообразный кислород, который поступает в камеру газогенератора из баллонов высокого давления. Функционально система подачи состоит из магистрали подачи окислителя с установленной на ней арматурой. Кислород из баллона через вентиль ВН5 поступает в магистраль окислителя стенда и через редуктор РД3, вентиль ВН6, обратный клапан КО2 и дроссельную шайбу ШЗ подается в газогенератор. Настройка стендовой магистрали на заданный массовый расход окислителя осуществляется редуктором РД3, дроссельной

шайбой Ш3 и контролируется с помощью манометров МН4 и МН5. Значение давления, необходимое для определения массового секундного расхода окислителя, фиксируется с помощью датчика давления ДД3.

Система подачи горючего в камеру газогенератора. В качестве горючего в газогенераторе используется газообразный метан, который поступает в камеру газогенератора из баллона высокого давления. Система подачи горючего состоит из магистралей подачи горючего в первую и во вторую зоны с установленной на них арматурой.

Первый контур используется для запуска газогенератора. Метан из баллона через вентиль ВН1 поступает в магистраль горючего, через вентиль ВН3 – в первый контур магистрали и через редуктор РД2, вентиль ВН4 и дроссельную шайбу Ш2 подается в первую зону камеры газогенератора. Настройка первого контура на заданный расход горючего осуществляется редуктором РД2 и контролируется манометрами МН1 и МН3. Давление в первом контуре, значение которого необходимо для определения массового секундного расхода горючего в первую зону газогенератора, регистрируется с помощью датчика давления ДД2.

Для независимого регулирования соотношения долей компонентов топлива в системе подачи горючего предусмотрен второй контур, обеспечивающий независимую подачу компонента во вторую зону газогенератора. Через вентиль ВН2, редуктор РД1, электропневмоклапан ЭПК, обратный клапан КО1 метан подается во вторую зону камеры газогенератора. Настройка второго контура на заданный массовый расход горючего осуществляется заданием давления редуктором РД1, дроссельной шайбой Ш1, контролируется манометрами МН1 и МН2 и регистрируется с помощью датчика давления ДД1.

Система управления стендом состоит из пульта управления, кабельных линий связи стендовых агрегатов и обеспечивает дистанционный запуск газогенератора, управление его работой во время испытаний и останов при подаче электрического сигнала с пульта управления на электропневмоклапан ЭПК, который прекращает подачу метана в газогенератор.

Конструкция модельного газогенератора. Экспериментальные исследования рабочего процесса выполнялись на модельном газогенераторе двухзонной схемы смесеобразования. Общий вид конструкции газогенератора представлен на рис. 2. Камера газогенератора выполнена разъемной и состоит из форкамеры (первая зона), узла тепло-массообмена, сопла и смесительной головки. Смесительная головка состоит из корпуса, в который устанавливаются свеча зажигания и три штуцера, через один из них осуществляется измерение давления, два других необходимы для подвода горючего и

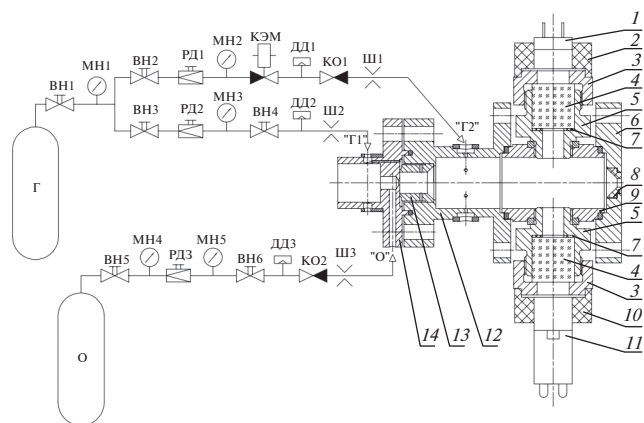


Рис. 2. Пневмогидравлическая схема установки и конструкция модельного газогенератора.

окислителя к первой зоне газогенератора. Обдур свечи электроискровой системы воспламенения осуществляется окислителем, который поступает в газогенератор через центральное осевое отверстие.

Газообразный метан подается в первую зону газогенератора через четыре отверстия диаметром 1.5 мм, выполненных в корпусе форкамеры 13 перпендикулярно ее оси. На внешней боковой цилиндрической поверхности смесительной головки 14 (свеча не показана) предусмотрены четыре паза, продольная ось которых перпендикулярна оси отверстий. Система каналов и отверстий образует коллектор подвода горючего в первую зону (цилиндрическая полость в корпусе форкамеры, в которой образуется смесь, воспламеняющая компоненты в газогенераторе).

Во вторую зону газогенератора метан подается из коллектора через шесть радиальных отверстий диаметром 1.5 мм, расположенных в корпусе 12. Все детали смесительной головки и второй зоны выполнены из нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

Модельный газогенератор предусматривает визуализацию внутрикамерных процессов при огневых испытаниях. Конструктивно узел визуализации включает в себя следующие детали (рис. 2): корпус 9; уплотнительные кольца; штуцеры 5; уплотнения из терморасширенного графита 7; смотровые окна 4, выполненные из полиметилметакрилата; накидные гайки 3. Оба штуцера 5 расположены в узле соосно и перпендикулярно основной оси газогенератора для обеспечения возможности организации сквозного (на просвет) наблюдения за рабочим процессом. К накидной гайке 3, наворачиваемой на штуцер 5 и фиксирующей смотровое окно 4, крепится держатель 2 фотоспротивления типа ФСД1 1. На такую же накидную гайку с помощью держателя 10 устанавливается светодиодная лампа NLL-G9-2.5-230-3К 11, радиационная температура излучения которой составляет 3000 К. При

Предельная погрешность регистрации определяющих и определяемых параметров

Параметр	Погрешность, %
Давление в камере (измерение манометрическим способом)	±0.51
Давление (измерение потенциометрическим датчиком)	±1.50
Массовое соотношение окислителя и горючего	±2.12
Интервалы времени	±0.24

этом выбор лампы осуществлялся исходя из необходимости гарантированного превышения ее радиационной температуры относительно яркостной температуры пламени.

Справа к узлу визуализации стыкуется фланец 6 с установленным в нем сменным графитовым вкладышем критического сечения сопла 8 диаметром 3 мм.

Системы измерения и регистрации. Система измерения включает в себя первичный измерительный преобразователь (датчик) давления в камере сгорания, датчики давления на магистралях окислителя ДДЗ, горючего первой ДД2 и второй ДД1 зон, а также фотосопротивление ФСД1 1 (рис. 2). Измерительная система станда базируется на цифровом регистратор-анализаторе динамических процессов МІС 300М.

Разработанные методики определения параметров рабочего процесса в модельном газогенераторе характеризуются тем, что преобладающей является систематическая погрешность. Результаты расчета предельных погрешностей основных параметров представлены в таблице, которые подтверждают удовлетворительную для теплофизического эксперимента точность.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА И САЖЕОБРАЗОВАНИЯ

На рис. 3 представлена осциллограмма испытания № 22_10_01. Данная осциллограмма характерна для всех проведенных огневых испытаний.

Особенностью циклограммы работы является двухступенчатый выход на расчетный режим работы газогенератора: первоначально метан подается только в первую зону. Это обеспечивает, во-первых, устойчивое воспламенение кислород-метановой смеси и, во-вторых, позволяет сравнить интенсивность излучения продуктов сгорания внутри газогенератора при подаче метана во вторую зону, когда топливная смесь значительно переобогащается горючим и соотношение содержаний компонентов топлива уменьшается до значений $K_m = 0.4-0.6$. Первоначально избыточное давление в газогенераторе составляет ~2.2 ати и в первой зоне и газогенераторе в целом $K_m = K_{m1} = 2.03$. После открытия электропневмоклапана подачи дополнительного расхода метана во вторую зону давление в газогенераторе возрастает до ~2.7 ати, а соотношение содержаний компонентов в газогенераторе уменьшается до $K_m = 0.61$. После регистрации показаний фотосопротивлений при работе в режиме в течение ~3-4 с происходит останов газогенератора.

Результаты записи напряжений, регистрируемых с помощью фотосопротивления, представлены на рис. 3 в виде относительного изменения сигнала U/U_0 . При горении топлива в газогенераторе на фотосопротивление попадают световые потоки от лампы подсветки и продуктов сгорания. Видно, что запуск газогенератора сопровождается локальным ростом величины U/U_0 , обусловленным излучением продуктов сгорания при температурах, превышающих радиационную температуру лампы подсветки. Это подтверждается видеосъемкой аналогичного испытания, отдельные видеок cadры которого приведены на рис. 4. После выхода на промежуточный режим работы уровень сигнала ($U/U_0 = 0.71$, 132-я с отсчета) практически соответствует начальному ($U/U_0 = 0.7$), регистрируемому фотосопротивлением только от светодиодной лампы.

Во втором (основном) режиме работы одновременно с открытием электропневмоклапана и

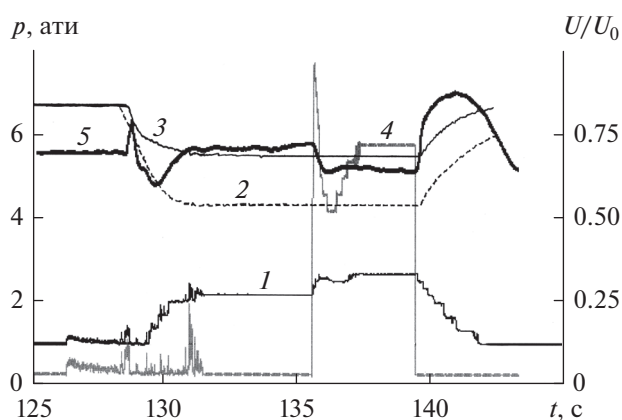


Рис. 3. Осциллограмма испытания № 22_10_01: 1 – давление в камере сгорания p_k , 2 – изменение давления подачи кислорода p_{O_2} , 3 – изменение давления подачи метана в первую $p_{CH_4}^1$ зону, 4 – вторую $p_{CH_4}^2$ зону, 5 – относительное изменение сигнала U/U_0 .

подачей метана во вторую зону газогенератора изменяется газодинамика горения рабочего процесса в камере газогенератора, что обусловлено, с одной стороны, повышением давления, а с другой – уменьшением K_m до 0.61. Последнее приводит к снижению равновесной температуры горения переобогащенной смеси с $T_1^* = 2656$ до $T_1^* = 982$ К и, соответственно, к уменьшению интенсивности излучения продуктов сгорания. Видеограмма работы в промежуточном режиме (рис. 4) свидетельствует, что до подачи метана во вторую зону при $K_m = 2.03$ визуально наблюдается факел продуктов сгорания на срезе сопла и интенсивное излучение продуктов сгорания внутри газогенератора, регистрируемое через окно из полиметилметакрилата. После подачи во вторую зону газогенератора дополнительного расхода метана вследствие снижения температуры реагирующей смеси при $K_m = 0.61$ интенсивность излучения продуктов сгорания за срезом сопла и внутри газогенератора уменьшается, и видеокамера регистрирует изображение на пороге чувствительности ПЗС-матрицы, а также догорание за срезом сопла газогенератора топливной смеси в окружающем воздухе.

Тем не менее, анализируя уменьшение относительного сигнала фотоспротивления ($U/U_0 = 0.64$) при подаче метана во вторую зону газогенератора ($K_m = 0.61$) и увеличение значений U/U_0 до первоначального уровня и более (рис. 4, промежуточный режим) при закрытии электропневмоклапана и прекращении подачи дополнительного расхода метана, представляется возможным заключить следующее. В промежуточном режиме ($K_m = K_{m1} = 2.03$) излучение от лампы не редуцируется холодными пристеночными слоями (которые имели бы место в случае неравномерного смешения горючего и окислителя) и не усиливается высокотемпературными продуктами сгорания (яркостная температура лампы превышает расчетную температуру горения). Однако при подаче дополнительного расхода метана и соответствующем переобогащении смеси ($K_m = 0.61$) первоначальной яркости не наблюдается, и это дает возможность заключить, что на пути излучения светодиодной лампы появляется среда – частицы сажи, рассеивающие или редуцирующие ее излучение. Появление других материальных объектов, например капель воды, не представляется возможным. Кроме того, результаты осмотра поверхности окна, выполненного из полиметилметакрилата, свидетельствуют о сохранении прозрачных свойств последнего и исключают возможность влияния окна на уменьшение значений U/U_0 . Поэтому данный результат может быть обусловлен появлением во второй зоне именно частиц сажи, например вследствие пиролиза находящегося в избытке метана [12–14]. Такая возможность определяется результатами термодинамического расчета.

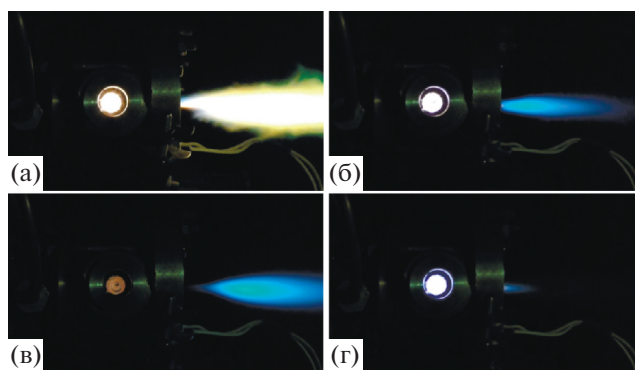


Рис. 4. Видеограмма испытания: (а) – выход на режим, (б) – работа в промежуточном режиме, (в) – работа в основном режиме, (г) – останов.

Превышение при останове газогенератора величин U/U_0 над значениями, зарегистрированными только от светового потока лампы, связано с тем, что при прекращении подачи метана во вторую зону газогенератора и сохранении неизменным значения K_{m1} температура продуктов сгорания увеличивается (причем возможно, чтобы K_m было больше 2.0) и, следовательно, излучение факела, видимое как за срезом сопла, так и внутри газогенератора, усиливает регистрируемый сигнал.

Следует отметить, что сажа может являться источником излучения при горении углеводородного топлива в различных энергосиловых установках, например при испытаниях и старте ракетносителей с жидкостными ракетными двигателями на углеводородном горючем. Однако в условиях проведения эксперимента уровень температур был недостаточным для того, чтобы частицы сажи излучали в видимой области спектра.

Также вблизи зоны подачи компонентов топлива возможен неравномерный профиль соотношения компонентов. При этом следует учитывать тот факт, что используются газообразные компоненты топлива, которые подаются как в первую, так и во вторую зоны газогенератора через равномерно по окружности расположенные отверстия в специальных коллекторах, что в совокупности обеспечивает быстрое и равномерное смешение окислителя и горючего. Это подтверждают данные визуализации внутрикамерных процессов, представленные в виде однородных изображений отдельных видеокладов на рис. 4.

Анализ изменения давлений подачи кислорода, метана в первую и вторую зоны и давления в камере сгорания в испытании № 22_10_04, приведенных на осциллограмме, позволяет сделать вывод о реализации устойчивого рабочего процесса в двухзонном газогенераторе при уменьшении суммарного соотношения содержаний компонентов от $K_m = 2.0$ до 0.4.

На рис. 5 приведены результаты огневых испытаний, проведенных для исследования влияния массового соотношения компонентов на нижний концентрационный предел образования сажи. При обеднении топливной смеси фотоспротивление регистрирует повышенный уровень излучения только в моменты запуска и останова газогенератора, когда возможно мгновенное образование близкого к стехиометрическому состава топливной смеси, обуславливающего высокие уровни температур и излучения пламени. Тем не менее подача метана во вторую зону на 173-й с испытания № 10_11_03, вызвавшая уменьшение значения K_m с $K_{m1} = 1.93$ до $K_m = 0.81$, практически не приводит к изменению регистрируемых фотоспротивлениями значений U/U_0 (рис. 5а).

При дальнейшем уменьшении концентрации метана в первой зоне до $K_{m1} = 1.17$ и, соответственно, увеличении значений массового соотношения компонентов подача метана во вторую зо-

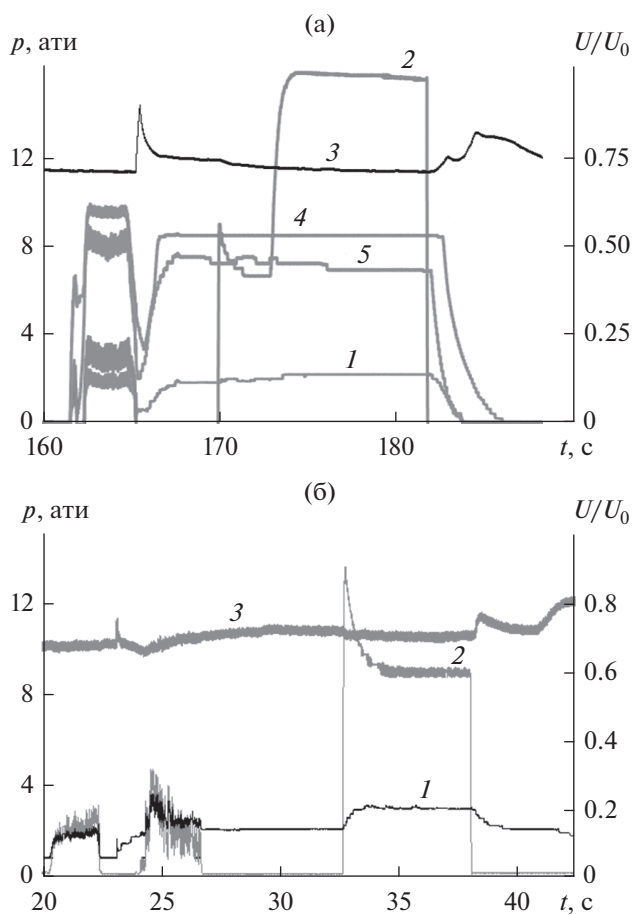


Рис. 5. Осциллограммы изменения режимных параметров испытаний № 10_11_03 (а) и № 10_11_04 (б): 1 – p_K , 2 – $p_{CH_4}^2$, 3 – U/U_0 , 4 – p_{O_2} , 5 – $p_{CH_4}^1$.

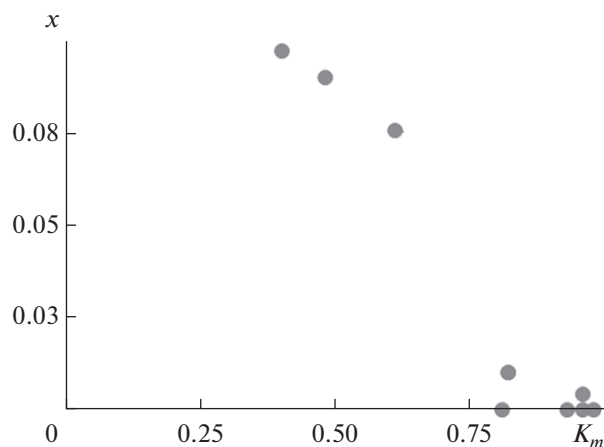


Рис. 6. Зависимость интенсивности ослабления x регистрируемого фотоспротивлением сигнала от массового соотношения компонентов K_m .

ну, в которой значение K_m становится равным 0.96, также не приводит к изменению U/U_0 (рис. 5б).

В заключение рассмотрим влияние массового соотношения компонентов на относительное ослабление сигнала x , регистрируемое фотоспротивлением до и после подачи метана во вторую зону газогенератора:

$$x = \frac{\left(\frac{U}{U_0}\right)_0}{\left(\frac{U}{U_0}\right)}$$

Как следует из приведенных на рис. 6 данных, переобогащение топлива при $K_m < 0.85$ приводит к увеличению ослабления регистрируемого фотоспротивлением сигнала от излучения светодиодной лампы вследствие процесса сажеобразования. Полученные экспериментальные данные согласуются с результатами термодинамического расчета (рис. 1), согласно которым при давлении 0.1–0.5 МПа отличная от нуля массовая концентрация сажи в продуктах сгорания возможна, если $K_m < 1.0$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резюмируя приведенные в данной работе результаты, можно заключить следующее.

1. Разработанные экспериментальная установка и модельный газогенератор на газообразных кислороде и метане, а также не требующая специального измерительного оборудования и условий проведения экспериментов методика экспериментальных исследований позволяют проводить огневые испытания с визуализацией внутрикамерных процессов в модельном газогенераторе в диапазоне

изменения массового соотношения компонентов топлива $K_m \approx 1.0$ при давлении 0.3–0.4 МПа.

2. Экспериментально определен верхний концентрационный предел возможного сажеобразования в продуктах сгорания кислород-метанового топлива при $K_m \approx 1.0$ и менее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Leontyev N.I., Kolkin Ye.N., Zavyalov V.S.* KB Khim-mash Lox/LNG Development Status // Mater. 48th Int. Astronautical Congress. Berlin, 2000. P. 23.
2. *Gorokhov V.D., Rachuk V.S., Grigorenko I.N.* Development of Liquid Propulsion Engines, Working on Liquefied Natural Gas and Liquid Oxygen // Mater. 1st Int. Conf. on Green Propellants for Space Propulsion. Noordwijk, Netherlands, 2001. P. 235.
3. *Katargin B.I., Klepikov I.A., Chvanov V.K.* The New Generation of Rocket Engines, Operating by Ecologically Safe Propellant “Liquid Oxygen and Liquefied Natural Gas (Methane)” // Acta Astronautica. 1997. V. 41. № 4. P. 209.
4. *Tamura H., Ono E., Kuma Kawa A.* LOX/Methane Staged Combustion Rocket Combustor Investigation // AIAA 87-1856.
5. *Дорофеев А.А., Ягодников Д.А.* Термодинамическое моделирование состава и характеристик продуктов сгорания переобогащенных жидких ракетных топлив в режиме закалки // ТВТ. 2018. Т. 56. № 2. С. 270.
6. *Heubner A.W.* High Pressure Lox/Hydrocarbon Preburner Injector Investigation // AIAA 82-1152.
7. *Елецкий А.В., Зицерман В.Ю., Кобзев Г.А.* Наноуглеродные материалы. Физико-химические и эксплуатационные свойства, методы синтеза, энергетические применения // ТВТ. 2015. Т. 53. № 1. С. 117.
8. *Мансуров З.А.* Образование сажи полициклических ароматических углеводородов, фуллеренов и углеродных нанотрубок при горении углеводорода // ИФЖ. 2011. Т. 84. № 1. С. 116.
9. *Krestinin A.V.* Detailed Modeling of Soot Formation in Hydrocarbon Pyrolysis // Combust. Flame. 2000. V. 121. № 3. P. 513.
10. *Leung K.M., Lindstedt R.P., Jones W.P.* A Simplified Reaction Mechanism of Soot Formation in Non-premixed Flames // Combust. Flame. 1991. V. 87. № 3–4. P. 289.
11. *Трусов Б.Г.* Программная система моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. № 1. С. 21.
12. *Warnatz J., Maas U., Dibble R.W.* Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation. Berlin–N.Y.: Springer, 2006. 390 p.
13. *Власов П.А., Смирнов В.Н., Тереза А.М. и др.* Влияние давления на процесс сажеобразования при пиролизе н-гексана и окислении богатых смесей н-гептана в отраженных ударных волнах // Хим. физика. 2016. Т. 35. № 12. С. 35.
14. *Tesner P.A., Shurupov S.V.* Soot Formation During Pyrolysis of Methane and Rich Methane-oxygen Mixtures // CST. 1995. V. 109. P. 399.