электронный научно-технический журнал
ИНЖЕНЕРНЫЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51036. ISSN 2307-0595

Экспериментальное исследование рабочего процесса в газогенераторе кислород-метанового ракетного двигателя

 # 10, октябрь 2014

Ягодников Д. А., Антонов Ю. В., Ворожеева О. А., Масальский Н. Л., Новиков А. О., Чертков К. О.

УДК: 536.46

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана
ЦНИИМАШ
daj@bmstu.ru

Введение

Расширение сферы использования космического пространства (навигация, связь, изучение ресурсов Земли, промышленность, разведка, телевидение, астрономия, метеорология, фармацевтика, медицина) предполагает использование ракет-носителей разных классов, не наносящих ущерба экологии околоземного пространства, а также способных к многоразовому использованию. При этом ключевым звеном является разработка жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), в частности кислородно-метанового ЖРД [1]. Метан обладает в рассматриваемом аспекте рядом важных преимуществ перед традиционным керосином, в частности:

- возможность создания замкнутой схемы жидкостного ракетного двигателя с восстановительным газогенератором;
- более высокие энергетические характеристики ракет (на 20-30% большая масса полезного груза при одинаковой массе ракеты);
- лучшие охлаждающие свойства метана;
- более низкую стоимость метана (втрое меньше чем у керосина).

Вопросами разработки ЖРД на сжиженном природном газе в России занимаются ведущие предприятия ракетно-космической отрасли НПО «Энергомаш» им. академика В.П. Глушко [2], КБ Химмаш им. А.М. Исаева – филиале ГКНПЦ им. М.В. Хруничева [3], НИИМашиностроения [4] и КБ Химавтоматики [5]. Экспериментально-теоретическими исследованиями, выполненными на указанных предприятиях, продемонстрирована принципиальная возможность организации устойчивого рабочего процесса и достижение 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 (ГГ) с избытком горючего, до настоящего времени детально не изучен. Актуальность проблемы образования сажи обусловлена обоснованием реальности разработки метанового ЖРД с дожиганием восстановительной схемы, которая при прочих равных условиях является более безопасной, чем схема ЖРД с дожиганием окислительного генераторного газа.

Так, разработка в НПО «Энергомаш» проектов создания ЖРД на кислороде и метане потребовала экспериментального изучения рабочего процесса в восстановительном газогенераторе. Проведено 66 испытаний [6] различных типов смесительных головок газогенератора в следующем диапазоне изменения основных параметров:

-давление в газогенераторе – 3...10 МПа;

-коэффициент избытка окислителя - $\alpha = 0{,}2 – 0{,}45$;

-температура генераторного газа - 1200... 1900 °С.

Авторы отмечают, что в исследованном диапазоне параметров сажа в продуктах сгорания практически отсутствует, однако численных значений относительного массового содержания сажи, к сожалению, не приводят.

Вопросам образования сажи, в основном, посвящены экспериментальные исследования переобогащенных метановых пламен, а также исследования, выполненные на лабораторных установках [7, 8].

Поэтому можно заключить, что экспериментальные работы по определению характеристик рабочего процесса в камерах сгорания, работающих на компонентах топлива метан-кислород, выполнены в ограниченном объеме и посвящены, в основном, получению интегральных характеристик рабочего процесса в камере сгорания ракетного двигателя без изучения их внутренних особенностей.

Теоретические исследования связаны с проведением термодинамических расчетов равновесного состава продуктов сгорания метана в кислороде применительно к условиям, характерным в камере сгорания ЖРД. Так, в работе [9] с использованием программного комплекса ТЕРРА [10] проведены расчетные исследования по определению концентрационных пределов появления конденсированной фазы в виде сажи в продуктах сгорания переобогащенной кислород-метановой смеси. Как следует из рисунка 1, сажа в продуктах сгорания образуется при значениях коэффициента избытка окислителя $\alpha < 0{,}3$. Максимум концентрации наблюдается при $\alpha \approx 0{,}3$. Причем с ростом давления сужаются концентрационные пределы образования сажи, а также ее относительная массовая концентрация z. Заметим, что данный диапазон значений α 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 эрозионного разрушения элементов конструкции двигателя.

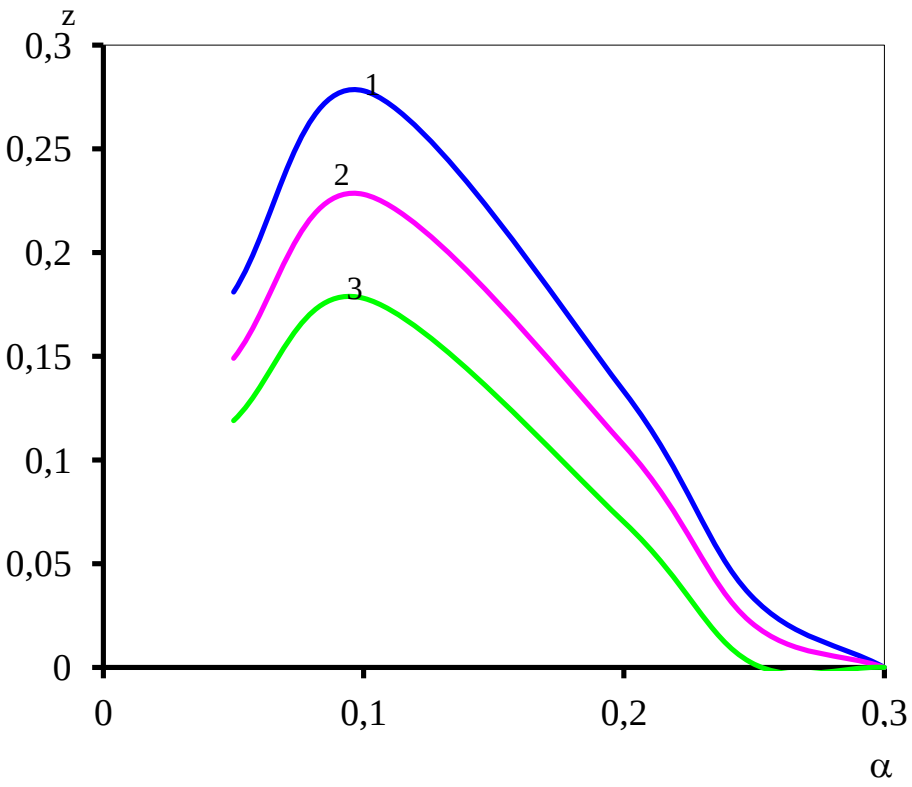


Рисунок 1. Зависимость относительной массовой концентрации сажи в продуктах сгорания от α при давлении 1- 0,1 МПа; 2- 0,5 МПа; 3- 2,5 МПа

На основании изложенного целью настоящей работы является анализ организации 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 стендовых испытаний, а также следующие системы, обеспечивающие функционирование стендовой установки.

1. Системы подачи окислителя и горючего.

2. Система принудительной вентиляции отсеков стенда.

3. Система управления газогенератором и стендом, включающая устройства запуска, останова и оперативного управления.

4. Системы визуального контроля и видеорегистрации.

6. Система измерений, состоящая из первичных преобразователей и датчиков измерительных цепей, линий связи и регистрирующей аппаратуры.

Рассмотрим далее состав и назначение основных систем пневмогидравлической системы стенда, представленной на рисунке 2.

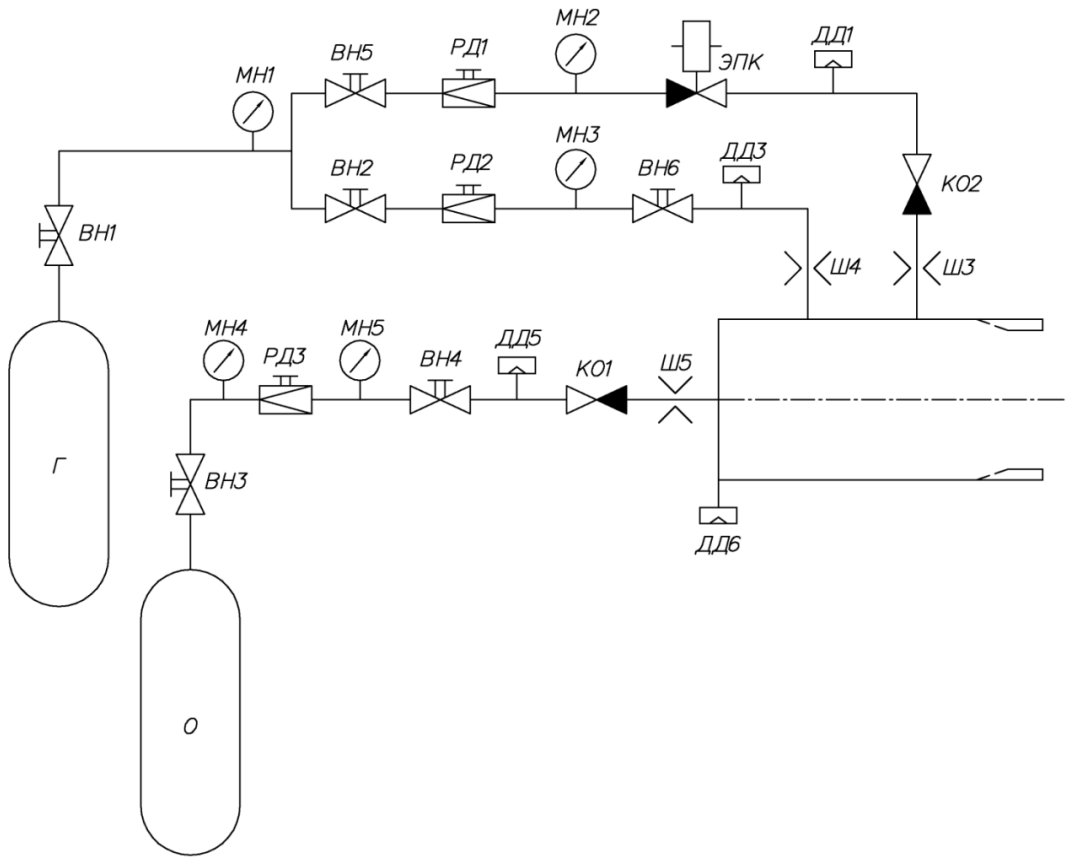


Рисунок 2. Пневмогидравлическая схема стенда

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 ВН3 поступает в магистраль окислителя стенда и через редуктор РД3, вентиль ВН4, обратный клапан КО1 и дроссельную шайбу Ш5 подается в газогенератор. Настройка стендовой магистрали на заданный расход окислителя осуществляется редуктором РД3 (настраивается вручную с помощью манометров МН4 и МН5).

Визуальный контроль давления до и после редуктора РД3 осуществляется с помощью манометров МН4 и МН5. Количественно давление в магистрали фиксируется с помощью датчика давления ДД5. Значение давления необходимо для определения массового секундного расхода окислителя. Обратный клапан КО1 предотвращает попадание продуктов сгорания из камеры газогенератора в магистраль подачи окислителя.

Установка дроссельной шайбы Ш5 преследует две цели:

– уменьшение влияния возможных забросов давления в камере газогенератора на элементы пневмогидравлической схемы, расположенных до шайбы;

– настройка гидравлических характеристик магистрали подачи окислителя на необходимый режим работы газогенератора.

Система подачи горючего в камеру газогенератора

В качестве горючего газогенератора используется газообразный метан, который поступает в камеру газогенератора из баллона высокого давления. Функционально 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 стенда. Через вентиль ВН2 метан поступает в первый контур магистрали горючего и через редуктор РД3, вентиль ВН6 и мерную (дроссельную) шайбу Ш4 подается в первую зону камеры газогенератора. Настройка первого контура стендовой магистрали на заданный расход горючего осуществляется редуктором РД2 (настраивается вручную с помощью манометров МН1 и МН3).

Визуальный контроль давления до и после редуктора РД2 осуществляется с помощью манометров МН1 и МН3. Количественно давление в первом контуре магистрали фиксируется с помощью датчика давления ДД3. Значение давления необходимо для определения массового секундного расхода горючего в первую зону газогенератора.

Для регулирования значения суммарного коэффициента избытка окислителя в системе подачи горючего предусмотрен отдельный контур, обеспечивающий независимую подачу компонента во вторую зону. Через вентиль ВН5 метан поступает во второй контур магистрали горючего и через редуктор РД1, электро-пневмо клапан ЭПК, обратный клапан КО2 и дроссельную шайбу Ш3 подается во вторую зону камеры газогенератора. Настройка второго контура стендовой магистрали на заданный расход горючего осуществляется редуктором РД1 (настраивается вручную с помощью манометров МН1 и МН2) и мерной шайбой Ш3.

Визуальный контроль давления до и после редуктора РД2 осуществляется с помощью манометров МН1 и МН2. Количественно давление во втором контуре магистрали фиксируется с помощью датчика давления ДД1. Определяемое с помощью этого датчика давление необходимо для определения массового секундного расхода горючего во вторую зону газогенератора и расчета коэффициента избытка окислителя во второй зоне.

Обратный клапан КО2 предотвращает попадание газа из камеры газогенератора во второй контур магистрали подачи горючего. Установка дроссельных шайб Ш4 и Ш3 преследует две цели:

– уменьшение влияния возможных забросов давления в камере газогенератора на элементы пневмогидравлической схемы, расположенных до шайбы;

– настройка гидравлических характеристик магистрали подачи горючего в первую зону (Ш4) и во вторую зону (Ш3) на необходимый режим работы газогенератора.

Система управления стендом состоит из пульта управления, а также кабельных линий связи стендовых агрегатов и обеспечивает дистанционный запуск газогенератора, управление его работой во время испытаний и останов, который производится при подаче электрического сигнала с пульта управления на ЭПК, которые последовательно прекращают подачу компонентов в газогенератор.

Конструкция модельного газогенератора

Для проведения экспериментального исследования рабочего процесса был изготовлен опытный образец газогенератора (ГГ), в котором реализована двузонная схема смесеобразования.

Общий вид конструкции газогенератора представлен на рисунке 3.

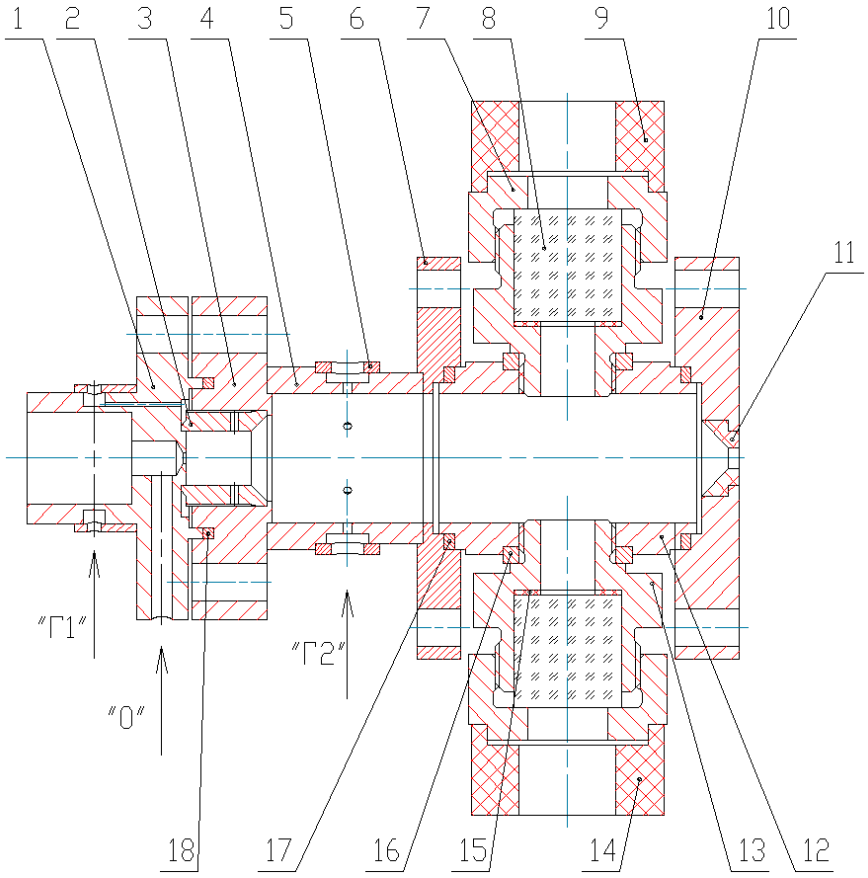


Рисунок 3. Конструкция модельного газогенератора. 1 – форсуночная головка (свеча условно не показана); 2 – форкамера; 3, 6, 10 – фланец; 4 – корпус второй зоны; 5 – кольцо коллектора горючего; 7 – накидная гайка; 8 – смотровое окно; 9 – держатель фотосопротивления; 11 – сопло; 12 – корпус; 13 – штуцер; 14 – держатель лампы; 15, 16, 17, 18 – уплотнительное кольцо. «О» – подача окислителя; «Г1» – подача горючего в первую зону; «Г2» – подача горючего во вторую зону.

Камера газогенератора выполнена разъемной и состоит из форкамеры (первая зона), узла тепломассообмена, сопла и смесительной головки, которые собираются при помощи резьбовых, сварных и болтовых соединений. Смесительная головка состоит из корпуса, в который устанавливается свеча. К корпусу форсуночной головки приварены три штуцера, через один из которых осуществляется измерение давления, два других необходимы для подвода горючего и окислителя к первой зоне газогенератора. Обдув свечи осуществляется окислителем, который поступает в газогенератор через центральное осевое отверстие.

В корпусе форкамеры 2 перпендикулярно ее оси просверлены 4 отверстия диаметром 1,5 мм (данный размер и количество получены на основе результатов численного моделирования). На внешней боковой цилиндрической поверхности путем фрезерования выполнены 4 паза, продольная ось которых перпендикулярна оси отверстий. Рассмотренная система каналов и отверстий образует коллектор подвода горючего в первую зону (цилиндрическая полость в корпусе форкамеры, в которой образуется смесь, воспламеняющая компоненты в газогенераторе).

В процессе сборки один торец форкамеры упирается в проточку, выполненную в корпусе фланца 3, другой поджимается форсуночной головкой 1. Сборка стыка осуществляется болтовым соединением, а его герметичность обеспечивается уплотнением замкового типа на основе медного кольца 18.

Вторую зону газогенератора образует цилиндрическая полость корпуса 4. В радиальном направлении просверлено 6 отверстий диаметром 1,5 мм. На внешней поверхности корпуса выполнена проточка, которая в совокупности с системой отверстий и кольцом 5 образует коллектор подачи вторичного горючего. С левого торца вторая зона соединяется с фланцем 3, посредством которого она состыкуется со смесительной головкой. К правому торцу присоединяется фланец 6. Все детали смесительной головки и второй зоны выполнены из нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

На рисунке 4 показана часть корпуса, обеспечивающего визуализацию внутрикамерных процессов при огневых испытаниях.

Рисунок 4. Общий вид узла визуальной регистрации

Конструктивно данная подсборка включает в себя следующие детали (см. рисунок 3): собственно корпус 12, уплотнительные кольца 16 и 17, штуцеры 13, уплотнения из терморасширенного графита 15, смотровые окна 8, выполненные из полиметилметакрилата (ПММА) (рисунок 4), накидные гайки 7. Оба штуцера 13 расположены в узле соосно и перпендикулярно основной оси газогенератора, с целью возможности организации сквозного (на просвет) наблюдения за рабочим процессом. К накидной гайке 7, которая в свою

очередь наворачивается на штуцер 13 и фиксирует смотровое окно 8, посредством специального держателя 9 крепится фотосопротивление типа ФСД1. К такой же накидной гайке, расположенной напротив, через специальный держатель 14 присоединяется светодиодная лампа NLL-G9-2.5-230-3K, радиционная температура которой составляет 3000 К. При этом подбор лампы осуществлялся исходя из необходимости гарантированного превышения ее световой температуры относительно яркостной температуры пламени.

Справа к узлу визуальной регистрации стыкуется фланец 10 с установленным в нем сменным графитовым вкладышем критического сечения сопла 11 диаметрами 3 мм, 4 мм. На рисунке 5 приведен общий вид газогенератора, установленного на стапеле стенда.

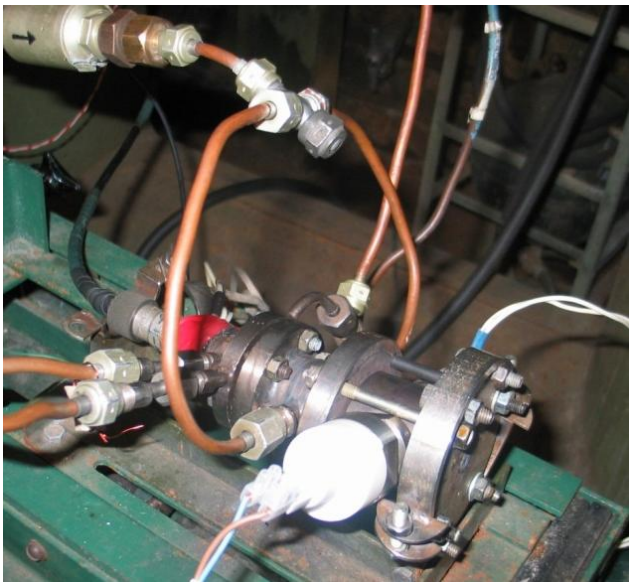


Рисунок 5. Модельный газогенератор на стапеле стенда

Системы измерения и регистрации

Система измерения включает в себя первичный измерительный преобразователь (датчик) давления в камере сгорания, датчик давления на магистрали окислителя, датчики давления на магистралях горючего первой и второй зон и фотосопротивление.

Измерительная система стенда базируется на цифровом регистратор-анализаторе для динамических процессов MIC 300M, позволяющем регистрировать аналоговые сигналы, в частности изменение напряжения в соответствующих электрических цепях установки датчиков.

Для практического использования результатов измерений необходимо знать их погрешность, определяемую систематической и случайной составляющей. Разработанные методики определения параметров рабочего процесса в модельном ГГ характеризуются тем, что преобладающей является систематическая погрешность. Результаты расчета предельных погрешностей основных параметров представлены в таблице 1, которые подтверждают удовлетворительную для теплофизического эксперимента точность.

Таблица 1. Предельная погрешность регистрации определяющих и определяемых параметров

№ п/п	Параметр	Погрешность
1	Давление в камере(измерение манометрическим способом)	± 0,51 %
2	Давление (измерение датчиком типа МД)	± 1,50%
3	Коэффициент избытка окислителя в установке	± 2,12 %
4	Интервалы времени	±0,24 %
5	Коэффициент расходного комплекса	± 2,60 %

Анализ результатов исследований модельного газогенератора

Первоначально для проверки возможности влияния электромагнитной наводки на фотосопротивление срабатывающим соленоидом ЭПК подачи метана во вторую зону была выполнена холодная продувка ГГ (испытание №22_10_02хп), результаты которой приведены на рисунке 6. Из циклограммы изменения относительного сигнала U/U_0 (U, U_0-текущее и наибольшее значение напряжения в цепи фотосопротивления) следует, что при прохождении команд на открытие и закрытие клапана изменение значений U/U_0 не происходит. Поэтому все изменения отношения сигналов U/U_0, зарегистрированные в процессе проведения экспериментов, будут обусловлены изменением внутрикамерных характеристик, в частности изменением интенсивности излучения продуктов сгорания.

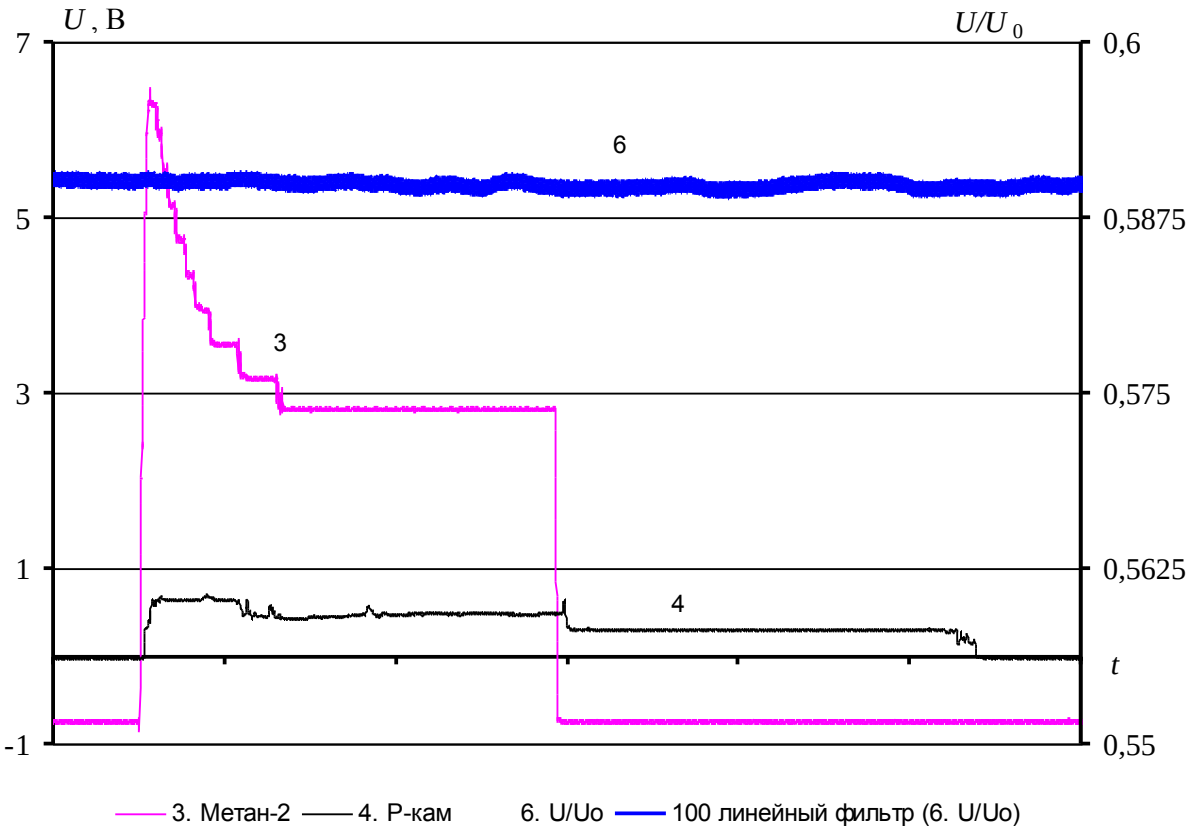


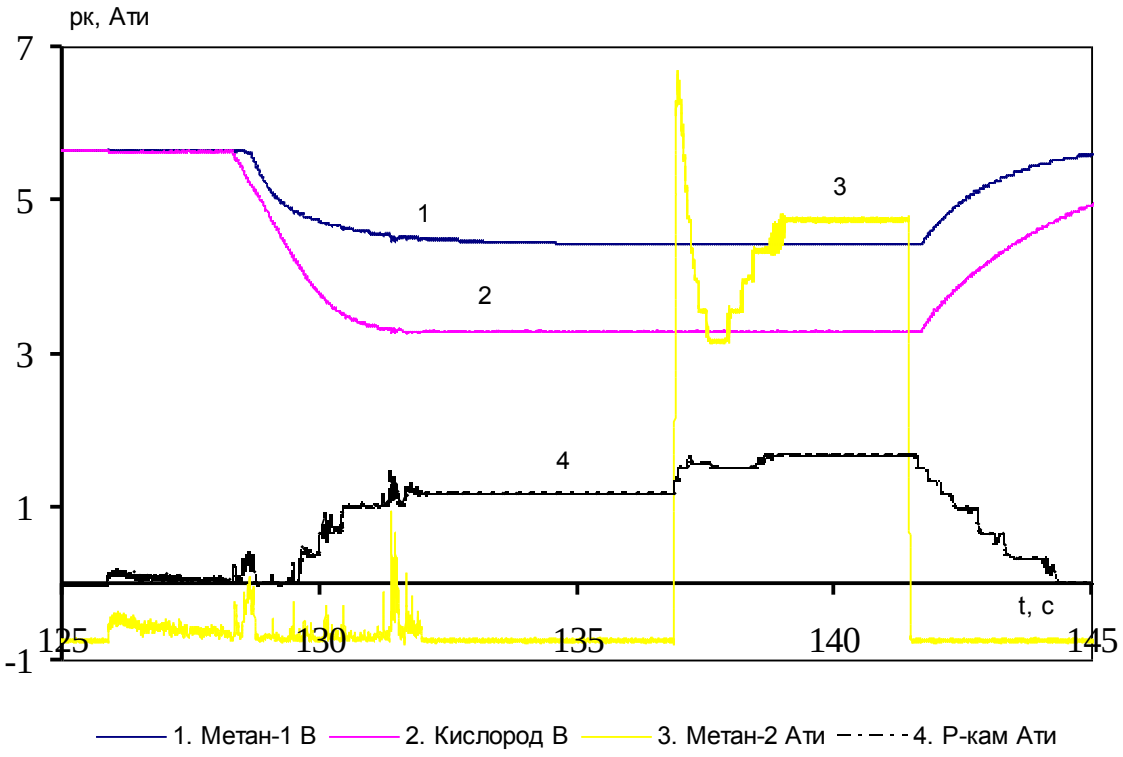
Рисунок 6. Осциллограмма холодной продувки ГГ, испытание №22_10_02хп. Изменение режимных параметров давление подачи метана во вторую зону, $p_к$ и относительного изменения сигнала фотосопротивления с линейной фильтрацией по 100 точкам

Рассмотрим далее результаты огневых стендовых испытаний (ОСИ) модельного газогенератора, полные результаты которых представлены в таблице №2. На рисунке 7, а представлена осциллограмма испытания №22_10_01, в частности изменение давлений подачи кислорода, метана в первую и вторую зоны и давления в камере сгорания $p_к$. Заметим, что данная осциллограмма характерна для всех проведенных ОСИ.

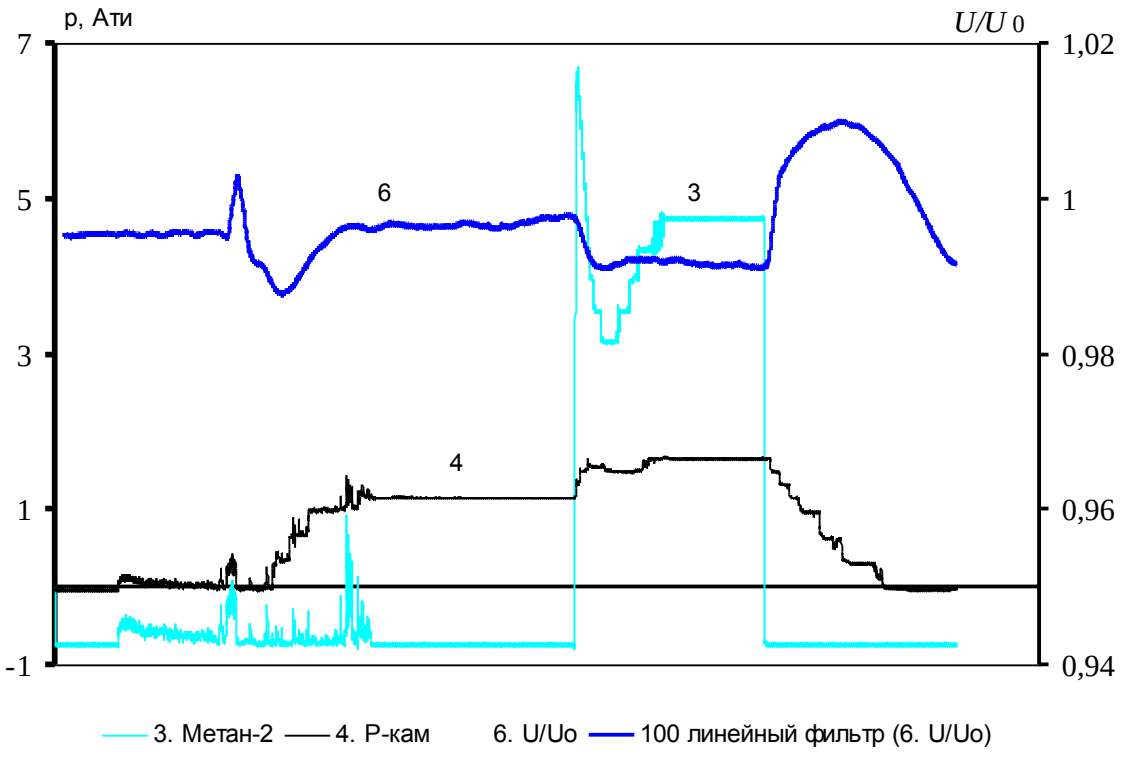
Особенностью циклограммы работы является двухступенчатый выход на расчетный режим работы ГГ: первоначально метан подается только в первую зону. Это обеспечивает, во-первых, устойчивое воспламенение кислород-метановой смеси и, во-вторых, позволяет сравнить интенсивность излучения продуктов сгорания внутри газогенератора при подаче метана во вторую зону, когда топливная смесь значительно обогащается горючим и коэффициент избытка окислителя уменьшается до значений $\alpha = 0{,}1 – 0{,}15$.

Первоначально давление в ГГ составляет 2,15 Ата и соотношение компонентов в первой зоне и ГГ в целом равно $\alpha_1 = 0{,}484$. После открытия электро-пневмоклапана (ЭПК) и подачи дополнительного расхода метана во вторую зону давление в ГГ возрастает до 2,65 Ата, а соотношение компонентов в ГГ уменьшается до $\alpha_2 = 0{,}149$. После регистрации показаний фотосопротивлений и работе на режиме в течение ~3-4 с, происходит останов газогенератора за счет снижения давления подачи окислителя и горючего, а также выключения ЭПК подачи метана во вторую зону.

Рассмотрим далее результаты записи напряжения, регистрируемых с помощью фотосопротивления, которые представлены на рисунке 7, б в виде относительного изменения сигнала U/U_0 после вторичной обработки в стандартном приложении MS Office – Excel с применением процедуры линейной фильтрацией по 100 точкам. Причем, при наличии горения в ГГ на фотосопротивление попадают световой поток от лампы подсветки и световой поток от высокотемпературных продуктов сгорания. Видно, что запуск ГГ сопровождается локальным ростом интенсивности излучения продуктов сгорания, что подтверждается видеосъемкой испытания при аналогичных режимных параметрах, отдельные видеокадры которого приведены на рисунке 8. После выхода на промежуточный режим работы ГГ уровень относительного сигнала ($U/U_0 = 0{,}985$) практически соответствует начальному ($U/U_0 = 0{,}990$ - $0{,}095$), который зарегистрирован до начала испытания (125 с отсчета). Полученные результаты свидетельствуют о незначительном увеличении суммарного светового потока, воспринимаемого фотосопротивлением.



а

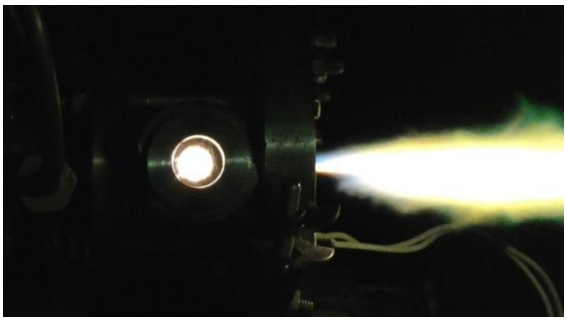


б

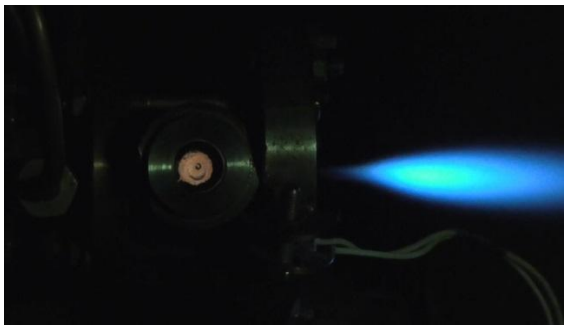
Рисунок 7. Осциллограмма испытания №22_10_01. Изменение режимных параметров и $p_к$ (а); относительное изменение сигнала фотосопротивления с линейной фильтрацией по 100 точкам (б)

На втором режиме работы одновременно с открытием ЭПК и подачей метана во вторую зону ГГ изменяется газодинамика горения рабочего процесса камере ГГ, что обусловлено, с одной стороны повышением давления, а с другой- уменьшением α_1 = 0,508 до α = 0,152. Последнее приводит к снижению температуры горения переобогащенной смеси с T^*_1 = 2656 К до T^*_2 = 982 К и, соответственно, к уменьшению интенсивности излучения продуктов сгорания. Кинограммы рисунка 8, в (испытание по режимным параметрам аналогично испытанию №22_10_01, но без подсветки лампой фотосопротивления) свидетельствуют, что до подачи метана во вторую зону при α_1 = 0,205 визуально наблюдается факел продуктов сгорания на срезе сопла и интенсивное излучение продуктов сгорания внутри ГГ, регистрируемое через прозрачный элемент- окно. После подачи во вторую зону ГГ дополнительно расхода метана и, соответственно, балластировки поступающих из первой зоны продуктов сгорания вследствие снижения температуры реагирующей смеси при α_2 = 0,205 интенсивность излучение продуктов сгорания за срезом сопла и внутри ГГ резко уменьшается и видеокамера регистрирует изображение на пороге чувствительности ПЗС-матрицы видеокамеры.

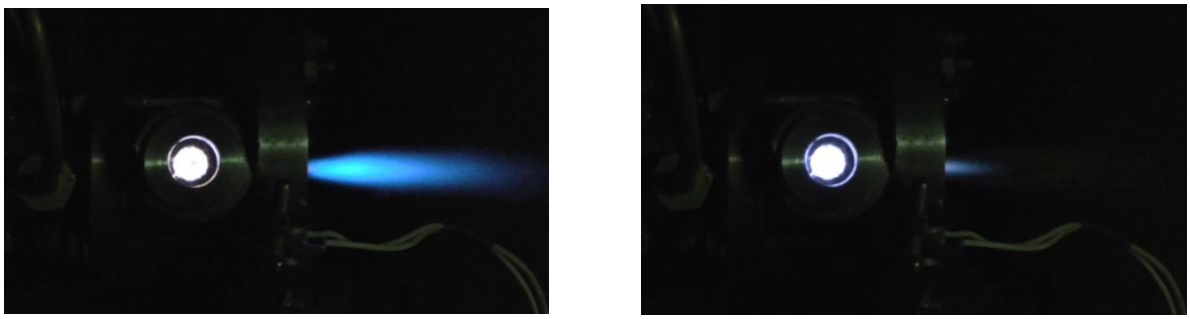
Тем не менее, анализируя уменьшение относительного сигнала фотосопротивления при открытии ЭПК и увеличение значений U/U_0 до первоначального уровня и более (см. рисунок 7, б) при закрытии ЭПК и прекращении подачи дополнительного расхода метана, представляется возможным заключить, что во внутреннем объеме ГГ на пути излучения светодиодной лампы появляется среда, рассеивающее или редуцирующее падающее на чувствительный элемент фотосопротивления световой поток. Данный результат может быть обусловлен появлением во второй зоне частиц сажи, вероятность которого определяется результатами термодинамического расчета. Превышение при останове ГГ величин U/U_0 над значениями, зарегистрированными только от светового потока лампы связано с тем, что при прекращении подачи метана во вторую зону ГГ и сохранении неизменным расходов компонентов в первую температура продуктов сгорания увеличивается (причем возможно соотношение компонентов может быть больше α_1 = 0,5) и, следовательно, излучение факела становится видимым как за срезом сопла, так и внутри ГГ.



а) выход на режим



в) работа на режиме, α_2=0,205

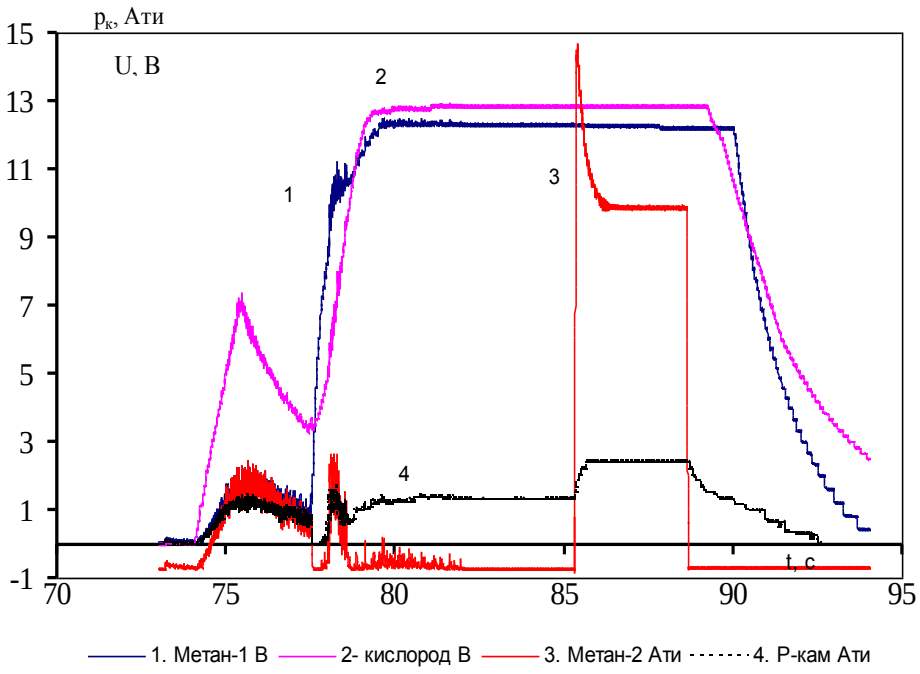


б) работа на режиме, α_1=0,500 г) останов

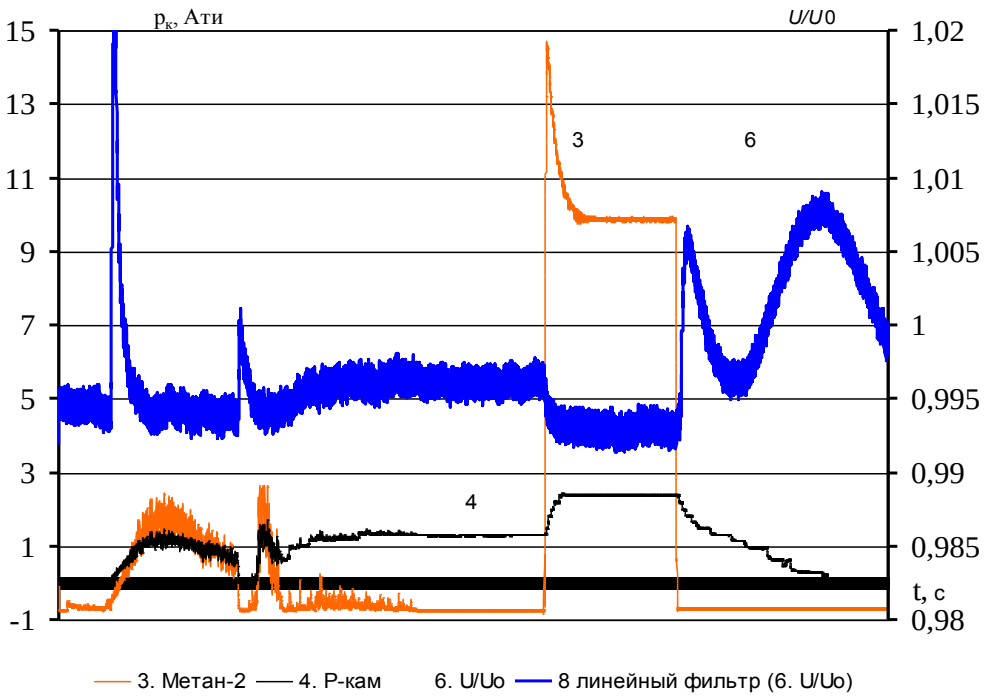
Рисунок 8. Видеограмма испытания №22_10_03

Необходимо особо отметить, что результаты осмотра ГГ не выявили наличие выпадения конденсированной фазы в виде частиц сажи на внутренние поверхности ГГ. Кроме того, состояние поверхности окна, выполненного из полиметилметакрилата (ПММА), свидетельствует о сохранении прозрачных свойств последнего и исключает возможность его быть причиной уменьшения значений U/U_0.

Анализ изменения давлений подачи кислорода, метана в первую и вторую зоны и давления в камере сгорания на огневых испытаниях №22_10_04, №22_10_06, №27_10_01, №10_11_05, приведенных на осциллограммах (рисунки 9 - 12) и видеограммах рабочего процесса в ГГ (рисунки 13, 14), позволяет сделать вывод об их принципиальной идентичности и реализации устойчивого рабочего процесса в ГГ при работе на двухзонной схеме в диапазоне уменьшения коэффициента избытка окислителя от $\alpha_2 \approx 0{,}240$ до $\alpha_2 \approx 0{,}099$.

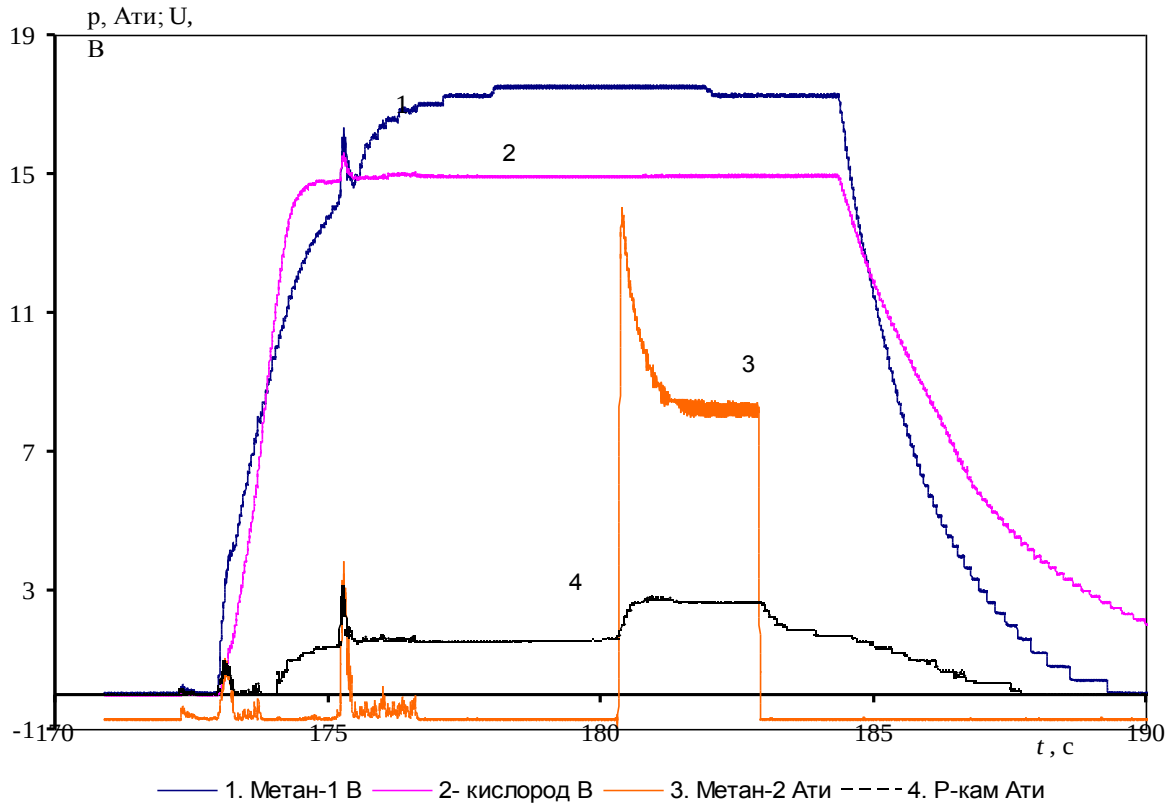


а

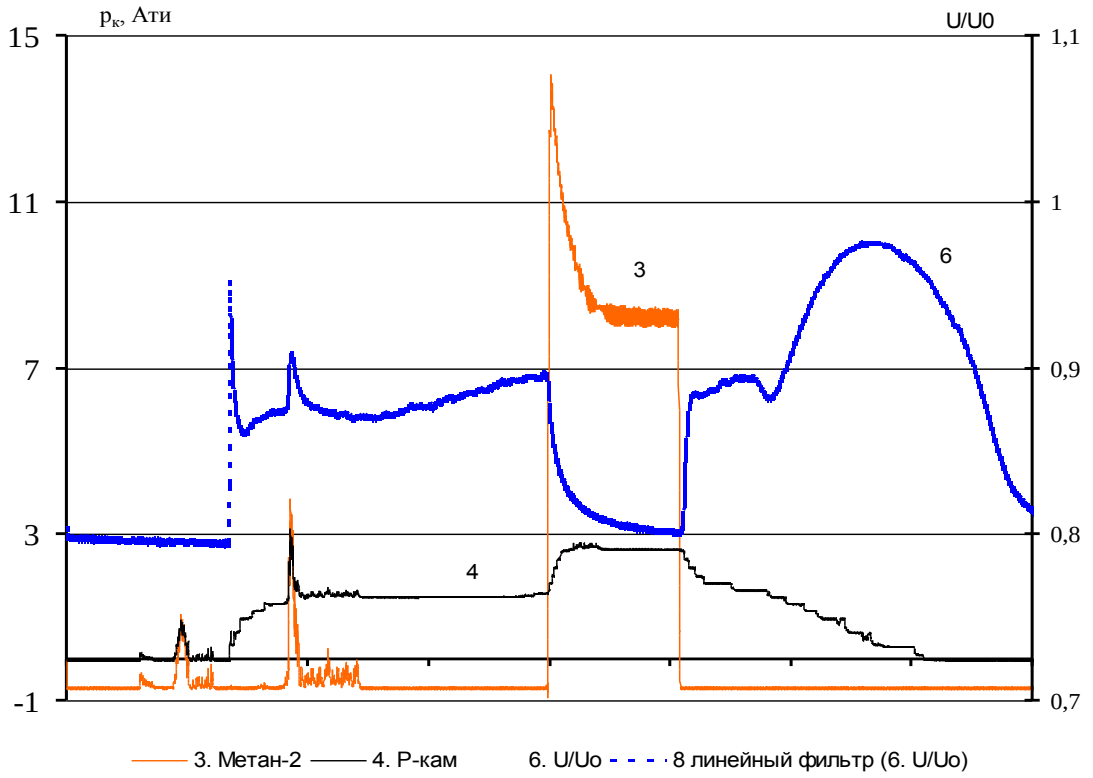


б

Рисунок 9. Осциллограмма испытания №22_10_04. Изменение режимных параметров и $p_к$ (а); относительное изменение сигнала фотосопротивления с линейной фильтрацией по 8 точкам (б)

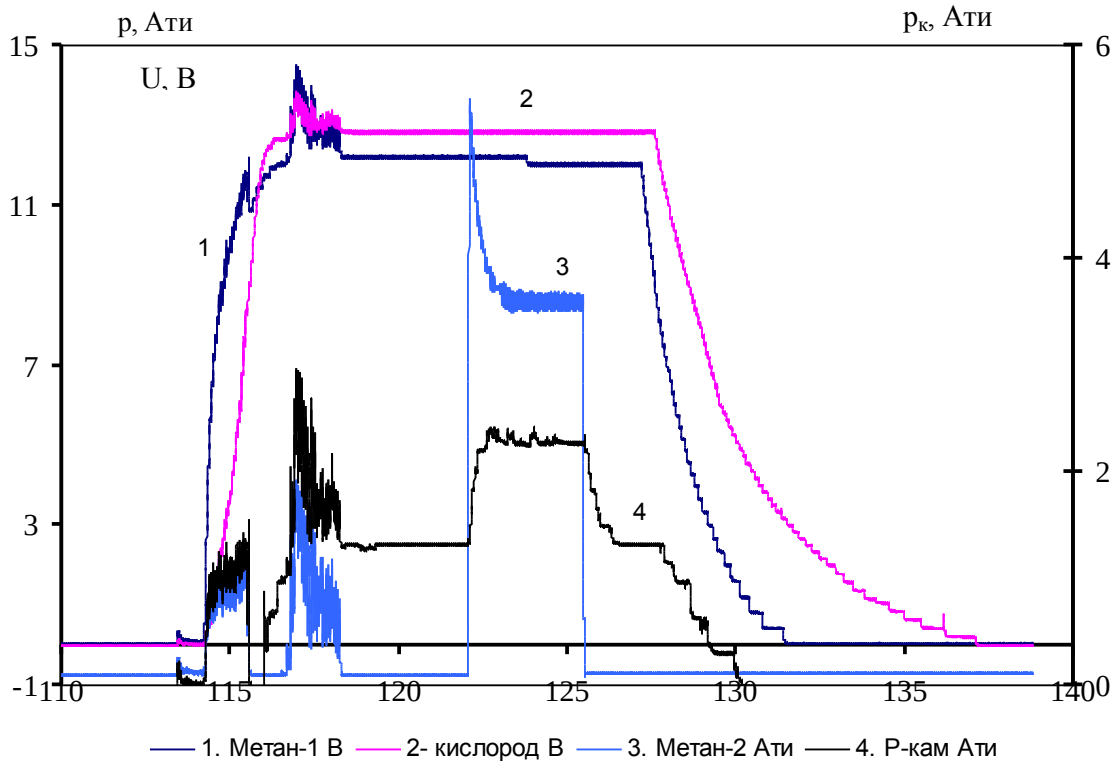


а

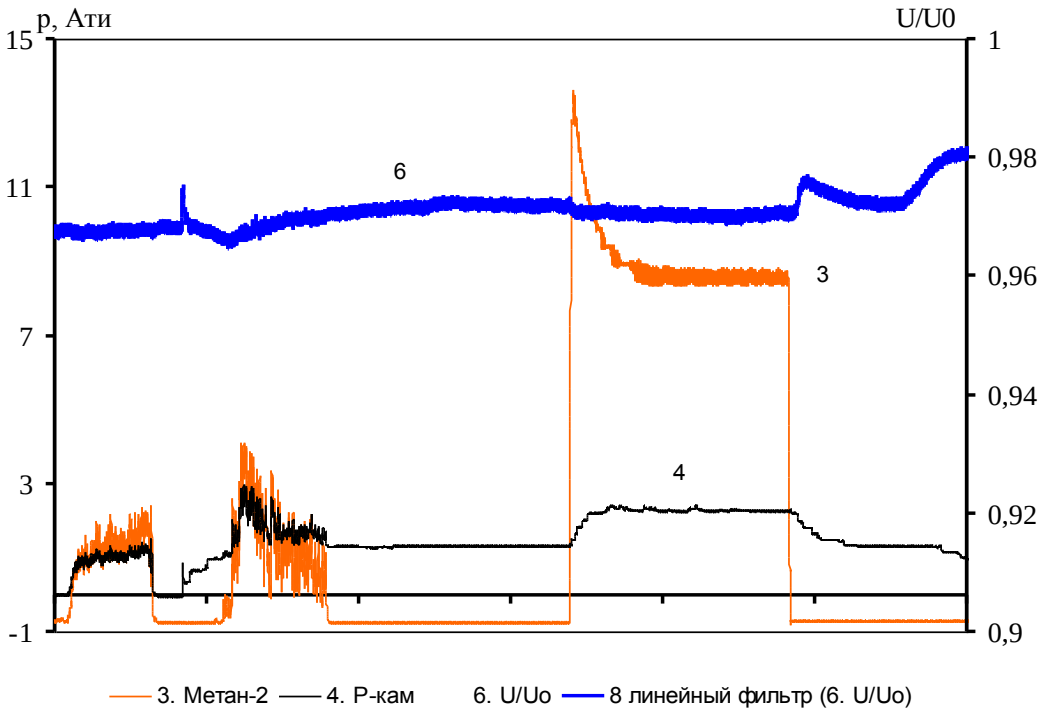


б

Рисунок 10. Осциллограмма испытания №22_10_06 на двухзонном ГГ. Изменение режимных параметров и $p_к$ (а); относительное изменение сигнала фотосопротивления с линейной фильтрацией по 8 точкам (б)

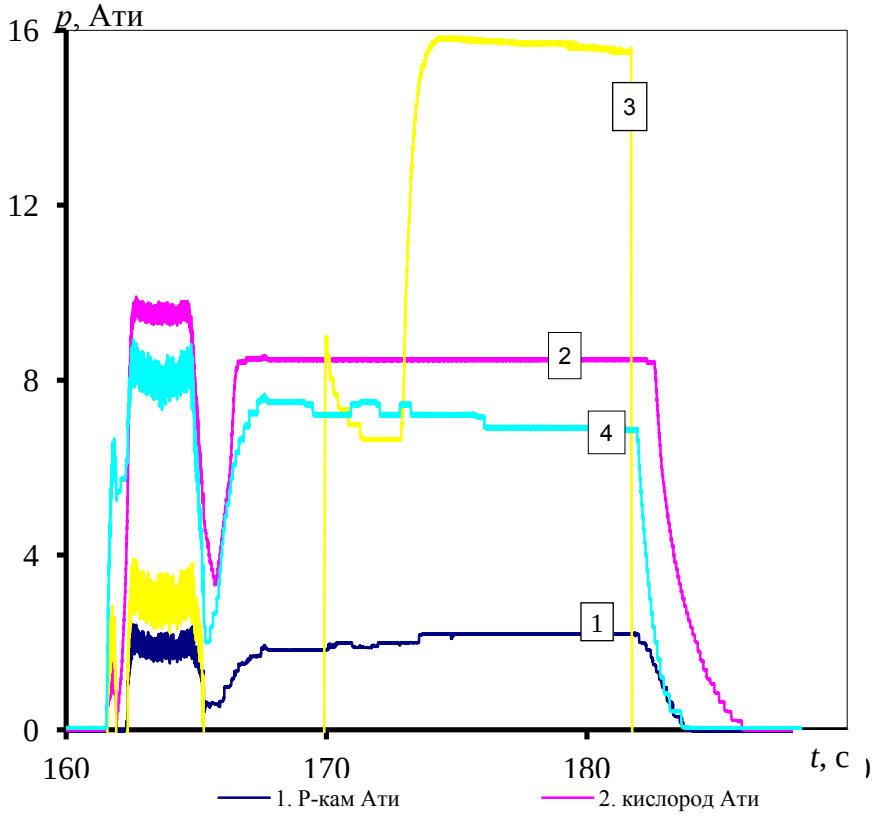


а

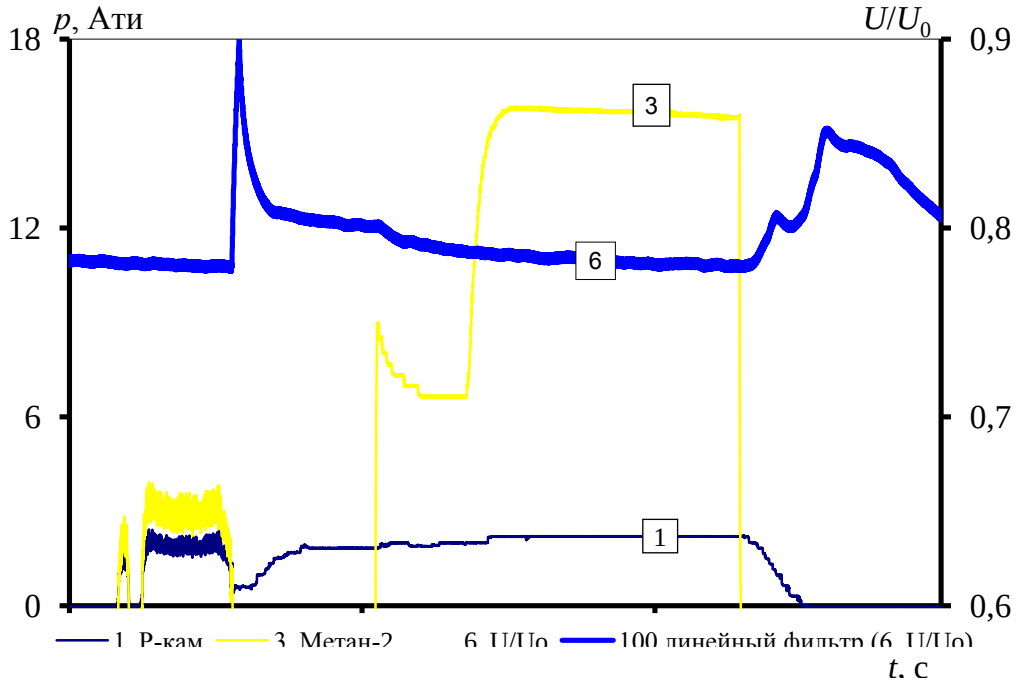


б

Рисунок 11. Осциллограмма испытания №27_10_01 на двухзонном ГГ. Изменение режимных параметров и $p_к$ (а); относительное изменение сигнала фотосопротивления с линейной фильтрацией по 8 точкам (б)

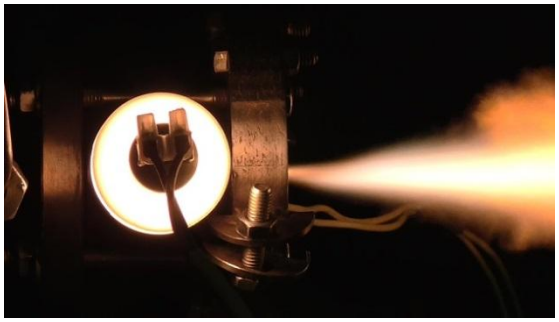


а

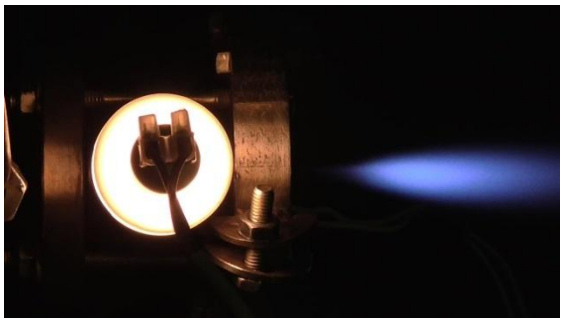


б

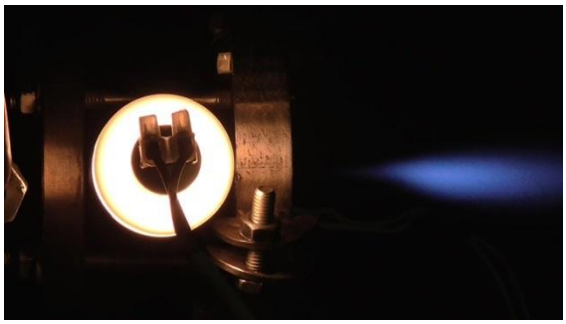
Рисунок 12. Осциллограмма испытания №10_11_03 на двухзонном ГГ. Изменение режимных параметров и $p_к$ (а); относительное изменение сигнала фотосопротивления с линейной фильтрацией по 100 точкам (б)



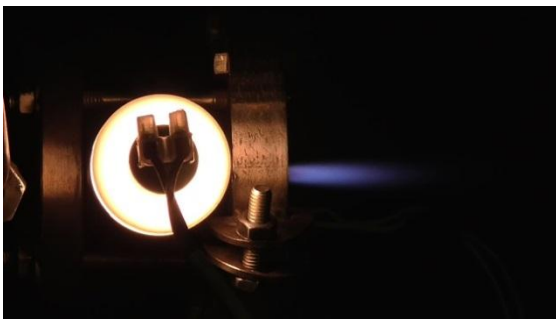
а) выход на режим



в) работа на режиме, α_2=0,099

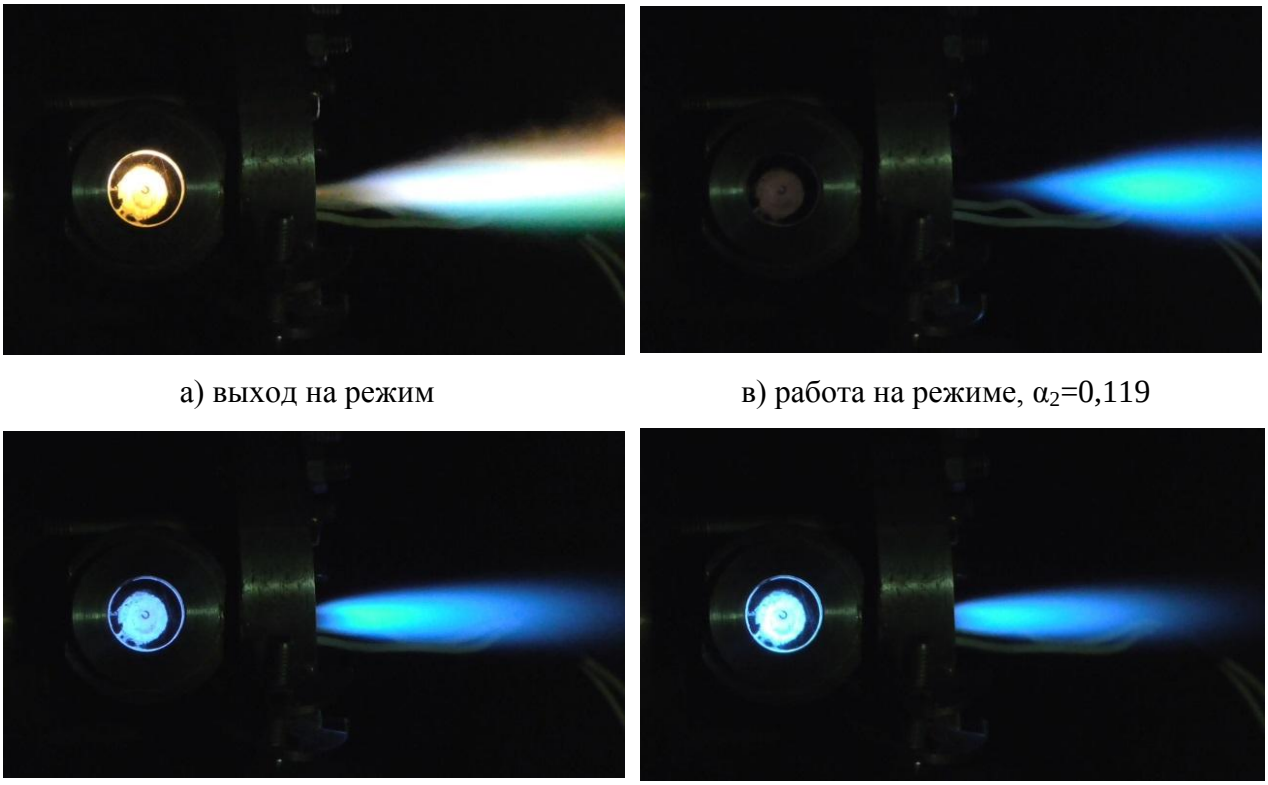


б) работа на режиме ,α_1=0,488



г) останов

Рисунок 13. Видеограмма испытания №22_10_04



а) выход на режим

в) работа на режиме, α_2=0,119

б) работа на режиме ,α_1=0,403

г) останов

Рисунок 14. Видеограмма испытания № 22_10_06

В заключении рассмотрим более подробно и проанализируем результаты регистрации показаний фотосопротивления. Как следует из приведенных на рисунке 7, б зависимостей U/U_0 (используется процедура линейной фильтрации по 100 точкам), при подаче метана во вторую зону для переобогащения смеси до $\alpha_2 \approx 0{,}10$ значение U/U_0 становиться меньше первоначального, определяемого световым потоком только лампы.

На осциллограммах испытания №22_10_06 (рисунок 10) приведены изменения режимных параметров, $p_к$ (а) и относительное изменение сигнала фотосопротивления с линейной фильтрацией по 8 точкам (б). При подаче метана во вторую зону коэффициент избытка окислителя составил $\alpha_2 \approx 0{,}118$. При этом зарегистрировано уменьшение яркости излучения продуктов сгорания в ГГ (рисунок 13). Уменьшение значения $U/U_0 = 0{,}9$ до $U/U_0 = 0{,}8$ свидетельствует о том, что на фотосопротивление падает меньше суммарного излучения от лампы подсветки и продуктов сгорания, что подтверждает возможное влияние сажеобразования в ГГ при указанном значении $\alpha_2 \approx 0{,}118$.

Испытание №27_10_01 проведено с целью подтверждения полученных результатов в испытании №22_10_04. Осциллограммы, приведенные на рисунке 11, б свидетельствуют о том, что при подаче метана во вторую зону происходит уменьшение значения U/U_0, однако в меньшей степени.

Результаты огневого испытания, проведенного для исследования влияния α на нижний концентрационный предел образования сажи, приведены на рисунке 12. Видно, что фотосопротивления регистрируют излучение продуктов сгорания только в моменты запуска и останова ГГ, когда возможно мгновенное образование близкого к стехиометрическому соотношению топливной смеси, обусловливающие высокие уровни температур и излучения пламени. Тем не менее на установившихся первом и втором режимах подача метана во вторую зону практически не приводит к изменению значений U/U_0. Причем на 174 с отсчета в данном эксперименте расход подаваемого во вторую зону метана был увеличен за счет увеличения давления перед мерной шайбой до 16,7 Ата, что привело к уменьшению коэффициента избытка окислителя до 0,202 и плавному уменьшению сигнала фотосопротивления.

Выводы

Резюмируя приведенные в данной работе результаты можно заключить, что разработанные экспериментальная установка, модельный газогенератор на метане, а также методика проведения экспериментальных исследований позволяют проводить огневые испытания с визуализацией внутрикамерных процессов в модельном газогенераторе и определять условия, способных привести к сажеобразованию при концентрациях, соответствующих значению коэффициента окислителя α ≈ 0,25 и менее и давлении 0,3 – 0, 4 МПа. Тем не менее поскольку следов сажи на внутренних поверхностях ГГ после огневых испытаний не обнаружено, то необходимы дополнительные экспериментальные исследования с использованием специальных методов диагностики, которые традиционно используются в экспериментальных исследования макрокинетических процессов сажеобразования в углеводородных пламенах, в частности лазерные методы диагностики.

Таблица 1 – Сводные результаты ОСИ

№ пуска	$p_{г1}$, МПа	$p_{г2}$, МПа	$p_{о}$, МПа	$p_{к}$, МПа	$m_{г1}$, г/с	$m_{г2}$, г/с	$m_{о}$, г/с	$m_{сум}$, г/с	α_1	α	$\beta_{эксп}$, м/с	$\beta_{теор}$, м/с	φ_β
Испытание № Э1-22-10-14 от 22.10.2014 г.													
№22_10_01	1,157	0,569	1,260	0,260	0,299	0,704	0,608	1,611	0,508	0,152	1233	1270	0,97
№22_10_02	1,314	0,373	1,358	0,118	0,340	0,461	0,656	1,457	0,482	0,205	-	-	-
№22_10_03	1,245	0,373	1,334	0,251	0,322	0,461	0,644	1,427	0,500	0,205	1306	1332	0,98
№22_10_04	1,294	1,069	1,353	0,332	0,335	1,323	0,653	2,311	0,488	0,099	1103	1176	0,94
№22_10_06	1,804	0,902	1,559	0,373	0,467	1,117	0,753	2,336	0,403	0,119	1215	1237	0,98
Испытание № Э1-27-10-14-1 от 27.10.2014 г.													
№27_10_01	1,275	0,941	1,353	0,324	0,330	1,165	0,653	2,148	0,495	0,109	152	1198	0,96
Испытание № Э1-10-11-14-2 от 10.11.2014 г.													
№10_11_01	0,784	1,637	0,931	0,310	0,994	0,210	1,159	2,363	0,291	0,240	1172	1364	0,86
№10_11_06	0,726	1,432	0,951	0,451	0,879	00,370	1,161	2,410	0,33	0,232	1323	1368	0,97

где $p_{г1}$ – давление подачи газообразного горючего в первую зону; $p_{г2}$ – давление подачи газообразного горючего во вторую зону; $p_о$ – давление подачи газообразного окислителя; $p_к$ – давление в КС; $m_{г1}$ – секундный массовый расход горючего в первую зону; $m_{г2}$ - секундный массовый расход горючего во вторую зону; $m_о$ - секундный массовый расход окислителя; $m_{сум}$ – секундный суммарный массовый расход; α_1 – коэффициент избытка окислителя в первой зоне; α - суммарный коэффициент избытка окислителя; $\beta_{эксп}$ – экспериментальное значение расходного комплекса; $\beta_{теор}$ – теоретическое значение расходного комплекса; φ_β – коэффициент расходного комплекса.

Список литературы

1. Вахниченко В.В., Петров В.И. Обоснование целесообразности опережающего создания кислородно-метанового жидкостного ракетного двигателя для перспективных ракет-носителей легкого, среднего и тяжелого классов // Космонавтика и ракетостроение.- 1998, №8.- С. 112-118.
2. Каторгин Б.И., Клепиков И.А., Чванов В.К. Новое поколение двигателей для ракет на экологически безопасном топливе “жидкий кислород-сжиженный природный газ (метан) // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. Машиностроение. Теория и практика современного ракетного двигателестроения.- 2004.- С. 58 – 67.
3. Leontyev N.I., Kolkin Ye.N., Zavyalov V.S. KB Khimmash Lox/LNG development status // 48-th intern. aerospace congress.- Berlin, 2000.- P. 23 – 28.
4. Салич В.Л., Кутуев Р.Х., Лебедев И.Н. Разработка перспективных РДМТ на экологически чистых топливных композициях // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2009. №3. С. 101 – 109.
5. Горохов В.Д., Кунавин С.П. Работы КБХА по создани перспективных ЖРД на компонентах топлива кислород-метан // Научно-технический сборник КБ Химавтоматики // Воронеж: Изд-во ИПФ, 2001.- С. 96 - 101.
6. Результаты экспериментальных работ в НПО “Энергомаш” по освоению метана как компонента топлива для ЖРД / Е.А. Белов, В.Ю. Богушев, И.А. Клепиков и др. // Труды НПО “Энергомаш” им. академика В.П. Глушко.- 2000.- Т. XVIII.- С. 86 - 100.
7. Получение синтез-газа в процессе горения метана: образование сажи и ее физико-химические характеристики / И. В. Билера [и др.] // Нефтехимия. - 2010. - Т. 50, № 5. - С. 351-355.
8. Hubner A.W. High pressure Lox/Hydrocarbon preburner injector investigation // 18th Propulsion Conference.- 1982, Clevelend.- 6 p.
9. Буркальцев В.А., Новиков А.В., Ягодников Д.А. Математическая модель и расчет характеристик рабочего процесса в камере сгорания ЖРД малой тяги на компонентах топлива метан-кислород // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. Машиностроение. Специальный выпуск Теория и практика современного ракетного двигателестроения.- 2004.- С. 8- 17.

10. Трусов Б.Г. Программная система TERRA для моделирования фазовых и химических равновесий // Труды XIV Межд. конф. по хим. термодинамике. – Санкт-Петербург, 2002.