

УДК 621.453

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИСТЕНКА
В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ МАЛОРАЗМЕРНОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРА
НА САМОВОСПЛАМЕНЯЮЩИХСЯ КОМПОНЕНТАХ ТОПЛИВА**

© 2013 С. А. Шустов

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Излагается методика экспериментального исследования физических процессов формирования пристенка, приводится описание объекта исследования. Излагаются результаты проведённого экспериментального исследования, связанные с определением изменения по длине камеры сгорания толщины, температуры и фазового состава пристенка. Приводятся результаты сравнения толщин пристенка и пограничного слоя по длине камеры сгорания.

Самовоспламеняющиеся компоненты топлива, смесительная головка, метод уноса массы, пристенок, пограничный слой, продукты сгорания, температура пристенка, толщина пристенка, фазовый состав пристенка.

В системах управления космическими аппаратами широкое распространение в качестве исполнительных органов получили малоразмерные газогенераторы сверхзвуковых потоков (МРГГ). Для современного поколения малоразмерных газогенераторов на самовоспламеняющихся компонентах топлива одной из проблем является реализация предельно-достижимых энергетических характеристик. В связи с этим непрерывно совершенствуется организация рабочих процессов в камере сгорания МРГГ, что ведёт к повышению среднemasсовой температуры продуктов сгорания. В настоящее время в камерах сгорания МРГГ с эффективной организацией рабочих процессов среднemasсовая температура достигает 2700 К при предельной температуре около 3000 К. При этом резко обостряется проблема обеспечения приемлемого теплового состояния МРГГ, усугубляемая невозможностью организации регенеративного охлаждения. Поэтому наиболее эффективным способом обеспечения приемлемого теплового состояния стенок камеры МРГГ является организация пристеночного охлаждения. Однако до настоящего времени физические процессы, связанные с формированием пристенка в МРГГ на самовоспламеняющихся компонентах топлива, слабо изучены вследствие их

сложности. Это ограничивает возможности организации эффективной системы охлаждения МРГГ и дальнейшее повышение энергетической эффективности камеры МРГГ. В связи с этим целью работы является разработка методики и проведения исследования основных физических процессов, связанных с формированием пристенка в МРГГ на самовоспламеняющихся компонентах топлива.

Объектом экспериментального исследования являлся штатный МРГГ тягой около 100 Н со струйно-центробежной схемой смесеобразования на самовоспламеняющихся компонентах топлива. В этой схеме основная часть компонентов подаётся через центральную двухкомпонентную форсунку, а часть окислителя подаётся через шесть струйных центробежных форсунок (рис. 1).

В процессе исследования использовалась модульная конструкция камеры штатного МРГГ, обеспечивающая за счёт использования различных вставок измерение важнейших параметров, характеризующих ключевые физические процессы, связанные с формированием пристенка по длине камеры сгорания: толщина пристенка, его фазовый состав и температура. Основные элементы модульной конструкции и её характерные размеры показаны на рис. 1.

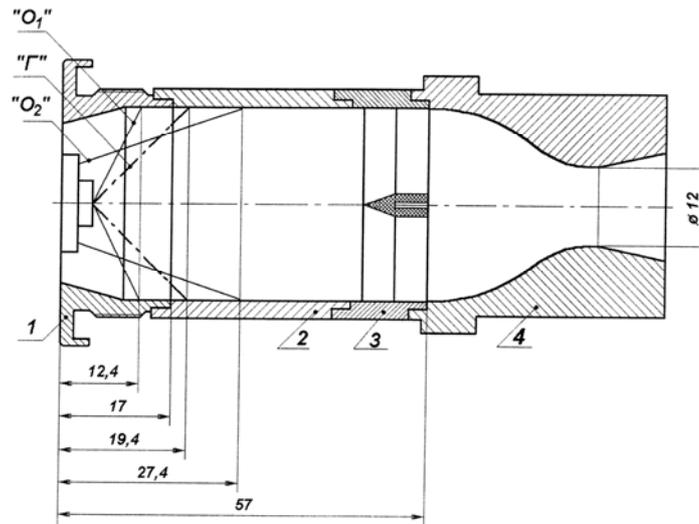


Рис. 1. Модульная конструкция камеры сгорания и сопла МРГГ:

- 1 – штатная смесительная головка камеры сгорания; 2 – цилиндрическая вставка;
 3 – экспериментальная вставка с пластиной для измерения температуры; 4 – сопло «Г»,
 «O₁» - конуса распыла горючего и окислителя центробежной форсунки;
 «O₂»- струи окислителя (6 струй)

Для измерения температуры в потоке продуктов сгорания, как в пристенке, так и за его пределами, использовался метод уноса масс [1]. Метод основан на использовании пластины из плексигласа (полиметилкрилата), которая устанавливалась в камеру сгорания с помощью специальной вставки на заданном расстоянии от плоскости смесительной головки (позиция 3 на рис.1). Эта вставка представляет собой цилиндр из нержавеющей стали, в одном из торцов которого закреплена металлическая пластина-державка. Перед началом эксперимента в державку этой экспериментальной вставки устанавливается пластина из плексигласа. При этом предварительно с помощью инструментального микроскопа определяется начальная высота пластины по всей её длине. Затем эта экспериментальная вставка устанавливается в модульную конструкцию камеры экспериментального МРГГ и стягивается с другими конструктивными элементами тремя стяжными болтами. При этом обеспечивается герметичность стыков элементов модульной конструкции без установки каких-либо уплотнений. Отсутствие уплотнений в сочетании с высокой точностью изготовле-

ния конструктивных элементов модуля обеспечивает сохранение невозмущённого характера течения продуктов сгорания в непосредственной близости от стенки, что важно для правильности определения профиля температуры в области пристенка. При установке экспериментальной вставки в модульную конструкцию фиксировалось положение пластины относительно базовой плоскости головки камеры сгорания по угловой координате с точностью $\pm 5^\circ$. После установки экспериментальной вставки с пластиной из полиметилкрилата МРГГ включался на 0,5 с, пластина извлекалась из экспериментальной вставки и проводилось измерение величины уноса пластины (уменьшение начальной высоты) с помощью инструментального микроскопа с 60-кратным увеличением (погрешность измерения не превышала 5 микрон). Затем с использованием градуировочной зависимости, связывающей величину уноса пластины с температурой [1], по величине уноса определялось значение температуры продуктов сгорания. Используемая методика обеспечивает измерения температуры в продольном, поперечном и угловом направлениях в диапазоне от 350 К до

3000 К с погрешностью, не превышающей 6% (при уровне доверительной вероятности 0,95). Для измерения температуры пристенка с помощью термопар, а также

определения фазового состояния пристенка и его химического состава использовалась экспериментальная вставка, схема которой показана на рис. 2.

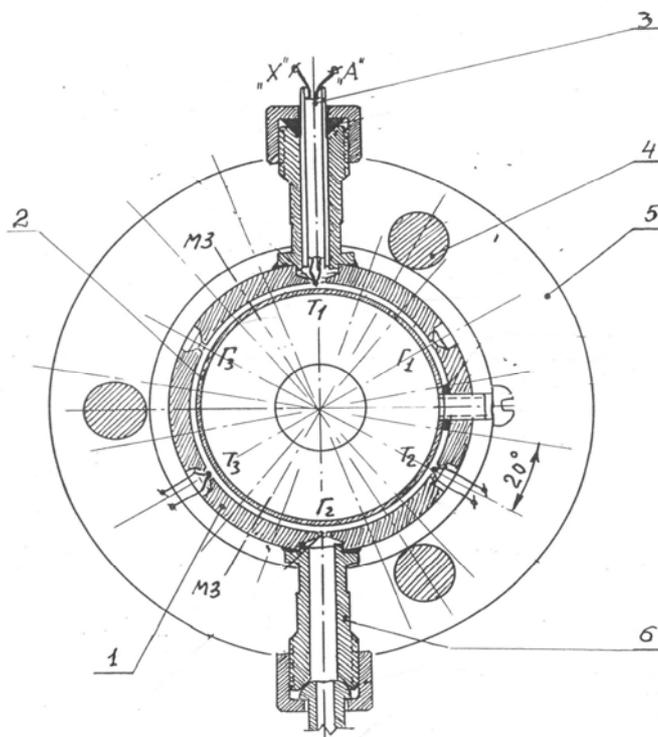


Рис. 2. Схема экспериментальной вставки для определения температуры, химического и фазового состава пристенка:

- 1 - корпус вставки; 2 - отсечное кольцо пристенка;
3 - корпус термопары; 4 - стяжной болт; 5 - нажимной фланец; 6 - корпус отборника газовой фазы

Основными элементами этой экспериментальной вставки является корпус 1, на внутренней стороне которого на расстоянии 0,5 мм закреплено отсечное кольцо 2. На внешней поверхности экспериментальной вставки размещены три корпуса для ввода термопар на угловом расстоянии друг от друга в 120° . Эти же корпуса используются для ввода датчиков фазового состава пристенка (принцип работы этих датчиков основан на изменении в зависимости от фазового состояния электропроводности среды, в которую помещён датчик). Таким же образом на внешней поверхности экспериментальной вставки размещались три корпуса отбора проб газовой фазы пристенка для определения её химического состава (позиция 6

на рис. 2). Экспериментальные вставки, показанные на рис. 1 и 2, соединялись с остальными элементами модульной конструкции камеры МРГГ (элементы 1,2 и 4 на рис.1) с помощью фланца на штатной смесительной головке и нажимного фланца на сопле (позиция 5 на рис.2) и стяжных болтов (позиция 6 на рис.2).

Изменение толщины пристенка в продольном и окружном направлениях определялось на основе экспериментально определённых полей температур в камере сгорания. За толщину пристенка принималось расстояние от стенки, на котором температура рабочего тела не превышала 400 К. Результаты экспериментального определения температуры продуктов сгорания и толщины пристенка в поперечных

сечениях камеры сгорания на расстояниях от среза форсуночной головки l_k , равных 28, 53 мм (штатная длина камеры сгорания) и 93 мм, приведены на рис.3–6.

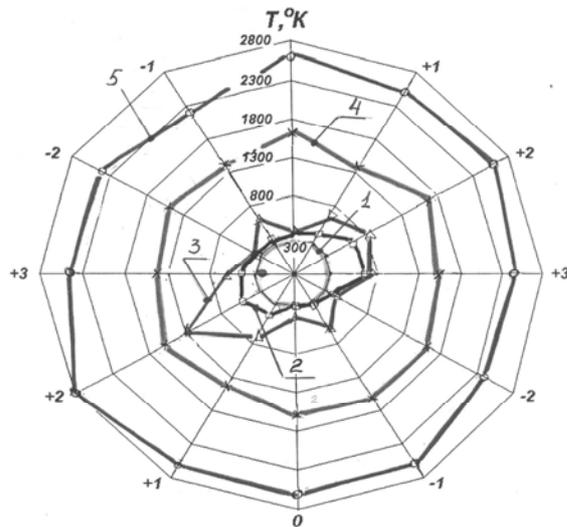


Рис. 3. Поле температур в поперечном сечении камеры сгорания на расстоянии 28 мм от плоскости смесительной головки:
1 - $d = 0$ мм; 2 - $d = 0,5$ мм; 3 - $d = 1$ мм;
4 - $d = 3$ мм; 5 - $d = 7,5$ мм
(d - расстояние от стенки)

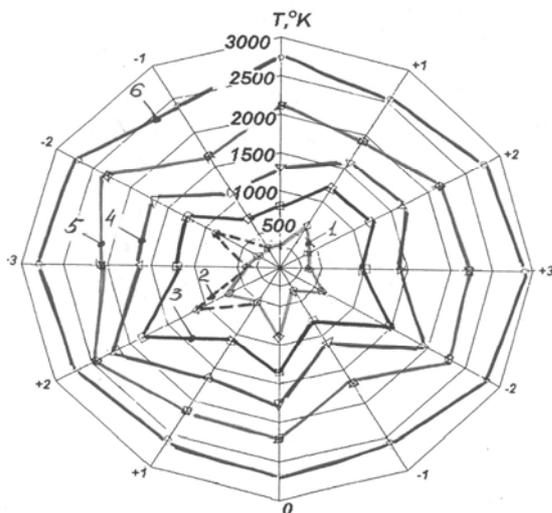


Рис. 4. Поле температур в поперечном сечении камеры сгорания на расстоянии 53 мм от плоскости смесительной головки:
1 - $d = 0$ мм; 2 - $d = 0,2$ мм; 3 - $d = 0,5$ мм;
4 - $d = 1$ мм; 5 - $d = 3$ мм; 6 - $d = 7,5$ мм
(d - расстояние от стенки)

На этих рисунках комбинации цифр (0,0), (+1,+1) соответствуют различному положению пластин из плексигласа с угловым расстоянием между соседними расположениями пластин, равным 60° . Такое расположение пластин из плексигласа в процессе проведения эксперимента обеспечивало получение информации о величине температуры продуктов сгорания как в радиальном, так и в окружном направлениях при фиксированном расстоянии пластин от среза форсуночной головки. Приведённые на рис. 3–6 результаты позволили выявить следующую физическую картину.

На расстоянии от плоскости смесительной головки менее 0,2 безразмерной длины камеры сгорания пристенок состоит из жидкой плёнки на стенке и газообразной фазы над ней. В диапазоне безразмерной длины камеры сгорания от 0,2 до 0,3 жидкая фаза пристенка переходит в газообразное состояние и при безразмерной длине камеры сгорания свыше 0,3 пристенок находится только в газовой фазе.

Изложим основные выявленные закономерности изменения толщины и температуры газовой фазы пристенка в продольном и окружном направлениях.

В сечении, расположенном на минимальном из исследованных расстояний от среза двухкомпонентной форсунки, равном 13 мм, толщина пристенка составляет от 1,5 мм до 3 мм. Затем, по мере удаления от среза форсунки, толщина пристенка непрерывно уменьшается. Так, на расстоянии 28 мм от среза форсунки толщина пристенка находится в диапазоне от 0,3 до 1 мм, имея существенную окружную неравномерность. На расстоянии 38 мм от среза форсунки толщина пристенка уменьшается до величины порядка 0,1 мм.

На рис. 4 показано поле температур в поперечном сечении камеры сгорания на расстоянии 53 мм от плоскости смесительной головки (соответствует штатной длине камеры сгорания исследованного МРГТ), а на рис. 5 показаны результаты

экспериментального определения толщины пристенка $d_{пр}$ в окружном направлении для поперечного сечения камеры сгорания на входе в сопло (сплошная линия). Приведённые на рис. 4 и 5 результаты показывают, что для штатной камеры сгорания в поперечном сечении камеры сгорания, соответствующем входу в сопло, толщина пристенка находится в диапазоне 0,05...0,1 мм. При этом в четырёх точках наблюдается нулевая толщина пристенка, т.е. имеет место нарушение его сплошности.

На рис. 6 приведены результаты экспериментального определения поля температур в поперечном сечении камеры сгорания на расстоянии 93 мм от плоскости смесительной головки, почти в два раза превышающем длину штатной камеры сгорания. Эти результаты были использованы для определения толщины пристенка в окружном направлении при этой длине камеры сгорания (пунктирная линия на рис. 5). Приведённые на рис. 5 и 6 результаты показывают, что на расстоянии 93 мм от плоскости смесительной головки пристенок фактически исчезает, остаются лишь его следы в четырёх небольших участках на стенке, в которых температура на 100–200 К отличается от температуры 400 К.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что исследованная схема смесеобразования обеспечивает как формирование устойчивого пристенка, так и его высокую эффективность с точки зрения защиты стенок камеры сгорания от высокотемпературных продуктов сгорания. Установлено, что используемый метод уноса масс позволяет фиксировать толщину пристенка вплоть до величин менее 0,1 мм (рис.5). Это свидетельствует о весьма высокой чувствительности данного метода.

Для более глубокого понимания физической картины процессов формирования пристенка в МРГГ на самовоспламеняющихся компонентах весьма важно иметь надёжные представления о химическом составе пристенка, а также о соот-

ношении толщин пристенка и пограничного слоя по длине камеры сгорания, начиная от плоскости смесительной головки.

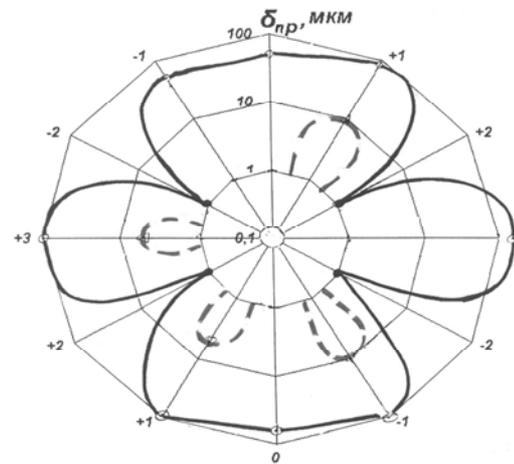


Рис. 5. Изменение толщины пристенка $d_{пр}$ в окружном направлении в поперечном сечении камеры сгорания на расстоянии 53 и 93 мм от плоскости смесительной головки:

- $l_k = 53$ мм; - - - $l_k = 93$ мм

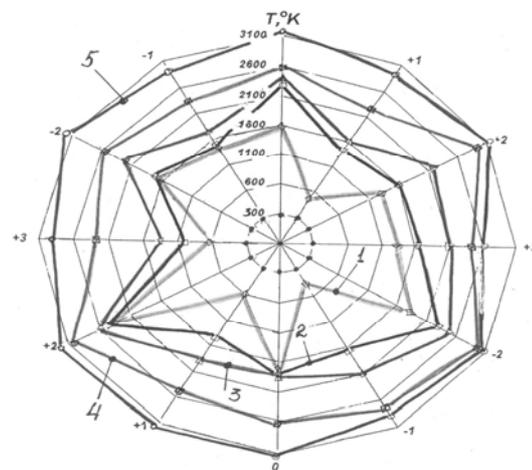


Рис. 6. Поле температур в поперечном сечении камеры сгорания на расстоянии 93 мм от плоскости смесительной головки:

1 - $d = 0$ мм; 2 - $d = 0,5$ мм; 3 - $d = 1$ мм;
4 - $d = 3$ мм; 5 - $d = 7,5$ мм
(d - расстояние от стенки)

Получение надёжных сведений о химическом составе пристенка является чрезвычайно сложной и не решённой до настоящего времени проблемой. Резуль-

таты проведённого химического анализа проб газовой фазы пристенка показали, что эта фаза пристенка не является парами какого-либо из компонентов и имеет весьма сложный химический состав. Выявленная в процессе исследования способность пристенка сохранять весьма низкую температуру, не превышающую 400 К по всей длине камеры сгорания независимо от его толщины, а также анализ результатов [2] проводят к выводу о том, что, вероятнее всего, пристенок для исследованной схемы смесеобразования представляет собой низкотемпературные продукты жидкофазного взаимодействия, так называемый парогаз.

Что касается соотношения толщин пристенка и пограничного слоя по длине камеры сгорания, то проведённое исследование показало: на расстоянии не более 30 мм от плоскости форсуночной головки толщина пристенка существенно превышает толщину пограничного слоя, на расстоянии от 30 до 60 мм эти толщины имеют одинаковый порядок, а на расстоянии свыше 60 мм толщина пристенка становится меньше толщины пограничного слоя.

Выводы

1. Разработана и апробирована методика экспериментального исследования, позволившая получить детальную информацию о формировании пристенка в камере сгорания штатного МРГГ на самовоспламеняющихся компонентах топлива со струйно-центробежной системой смесеобразования.

2. Показано, что в диапазоне безразмерной длины камеры сгорания от 0,2 до 0,3 жидкая фаза пристенка переходит в газообразное состояние и при безразмерной длине камеры сгорания свыше 0,3 пристенок находится только в газовой фазе.

3. Выявлены закономерности формирования газовой фазы пристенка, толщина которого вблизи смесительной головки составляет несколько миллиметров, а на входе в сопло для штатной длины камеры сгорания толщина находится в диапазоне от 0,1 до 0,2 мм.

4. Установлено, что газовая фаза пристенка для исследованной схемы смесеобразования не является парами какого-либо из компонентов и имеет весьма сложный химический состав. Выявленная способность пристенка сохранять весьма низкую температуру, не превышающую 400 К по всей длине камеры сгорания, приводит к выводу о том, что, вероятнее всего, пристенок для исследованной схемы смесеобразования представляет собой низкотемпературные продукты жидкофазного взаимодействия, так называемый парогаз.

5. Показано, что для исследованной схемы смесеобразования МРГГ толщина пристенка существенно превышает толщину пограничного слоя на расстоянии от плоскости форсуночной головки не более 30 мм. На расстоянии от 30 до 60 мм эти толщины пристенка и пограничного слоя имеют одинаковый порядок, а на расстоянии свыше 60 мм толщина пристенка становится меньше толщины пограничного слоя.

Библиографический список

1. Метод определения профилей состава и температуры высокотемпературных газовых потоков [Текст] / В.Н. Градов, В.Е. Нигодюк С.А. Шустов [и др.] // Инженерно-физический журнал, 1980. – Т. XXXVIII. – С. 853-858.

2. Нигодюк, В.Е. Исследование закономерностей жидкофазного взаимодействия компонентов СЖРТ [Текст] / В.Е. Нигодюк, А.В Сулинов // Вестник СГАУ, 2009. – Ч.2. – №3 (19). – С. 316-320.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF WALL BOUNDARY FLOW FORMATION IN THE COMBUSTION CHAMBER OF A SMALL GAS GENERATOR WITH SELF-IGNITING FUEL COMPONENTS

© 2013 S. A. Shustov

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

The paper presents a method of experimental investigation of physical processes taking place in the formation of a wall boundary flow. The object of investigation is described. The results of the experimental research are presented. They are related to such parameters as changes in the thickness, temperature and phase composition of the wall boundary flow. The results of comparing the thickness of the wall boundary flow and that of the boundary layer along the combustion chamber are given.

Self-igniting fuel components, mixing head, ablation process method, wall boundary flow, boundary layer, combustion products, wall boundary flow temperature, wall boundary flow thickness, wall boundary flow phase composition.

Информация об авторе

Шустов Станислав Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: shustov.st@yandex.ru. Область научных интересов: термогазодинамика ракетных двигателей.

Shustov Stanislav Alekseevich, candidate of technical science, associate professor, the department of aircraft engine theory, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: shustov.st@yandex.ru. Area of research: thermal gas dynamics of rocket engines.