

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРА ДЛЯ МНОГОРЕЖИМНОГО ОДНОКАМЕРНОГО ДВИГАТЕЛЯ¹⁾

Канд. техн. наук А.П. Аджян

Дано описание конструкции газогенератора. Изложены особенности ее поэтапной отработки с использованием результатов исследований процесса газогенерации на модельной установке. Особое внимание уделено обеспечению стабильности горения в газогенераторе на режиме глубокого дросселирования. В процессе отработки конструкции исследованиям были подвергнуты различные варианты форсунок и послефорсуночных каналов. По опыту изготовления и эксплуатации двигателей РД180 и РД171М в разрабатываемый газогенератор введены некоторые конструктивно-технологические усовершенствования.

Ключевые слова: жидкостные ракетные двигатели, газогенераторы, конструкция, форсунки, горение.

Введение

Кислородно-керосиновый многорежимный однокамерный двигатель выдвинул особо жесткие требования к характеристикам газогенератора:

– надежность работы при рекордно высоких значениях давления и температуры;

¹⁾ Автор отмечает поддержку этой работы со стороны безвременно ушедшего из жизни начальника отдела В.Ю. Богушева, не только высоко оценившего фланцевую конструкцию газогенератора, но и участвовавшего в анализе опытных данных, и предлагавшего конкретные конструктивные решения.

– необходимость обеспечения глубокого дросселирования.

Так, при переходе двигателя на режим 30% номинальной тяги температура генераторного газа снижается с 650°C до 90°C; при этом перепад давления на форсунках по линии окислителя снижается более чем в десять раз, а по линии горючего – более чем в 50 раз.

Параметры газогенератора приведены в таблице для максимального и минимального режимов работы двигателя (соответственно 105 и 27% по тяге).

Параметр	Обозначение	Значение параметров	
		max, 105%	min, 27%
Давление в газогенераторе	$p_{г}$, кгс/см ²	600	116
Температура продуктов газогенерации	T , °C	648	84
Массовое соотношение компонентов топлива	K_m	49	100
Расход окислителя	\dot{m}_o , кг/с	484	131
Расход горючего	$\dot{m}_г$, кг/с	9,9	1,31
Перепад давления на форсунках по линии горючего.	$\Delta p_{гф}$, кгс/см ²	~ 27	~ 0,47

Кроме этого, в современных экономических условиях особую значимость приобретают сроки и стоимость разработки. Поэтому при выборе облика газогенератора был использован весь положительный опыт отработки газогенераторов двигателей-прототипов РД180 и РД171М. Применена поэтапная отработка конструкции:

- отработка при гидравлических проливках;
- исследование рабочего процесса на натуральных компонентах в составе модельной установки.

Мобильность в оптимизации системы смесеобразования в составе доводочных двигателей обеспечивалась за счет фланцевого крепления смесительной головки (СГ) в газогенераторе.

Основные конструктивные решения

Конструкция газогенератора показана на рис. 1. Он состоит из корпуса и смесительной головки.

В корпусе выполнен сферический коллектор распределения окислителя по периметрам смесительной головки и охлаждаемой проставки корпуса, которая формирует полость камеры газогенератора.

Смесительная головка состоит из силового кольца, форсунок и утолщенного огневого днища. Смесительным элементом головки является комбинация форсунки и соосного с ней цилиндрического канала в огневом днище.

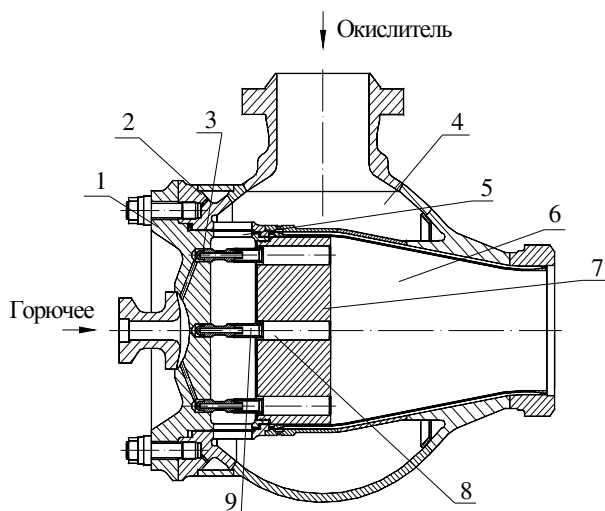


Рис. 1. Конструкция окислительного газогенератора: 1 – смесительная головка; 2 – корпус; 3 – двухкомпонентные форсунки; 4 – коллектор окислителя; 5 – отверстия перепуска; 6 – камера газогенератора; 7 – утолщенное огневое днище, 8 – зона балластировки; 9 – первая зона форсунки

Форсунки – двухкомпонентные, форкамерного типа. В первую зону форсунок поступает весь расход горючего и часть (~1/4) расхода окислителя.

Назначение первой зоны – получение высокотемпературного (~ 2000 К) факела. В зоне баллаستировки высокотемпературный факел разбавляется оставшимся окислителем, который поступает по каналам между форсункой и отверстием огневого днища, снижая среднюю температуру генераторного газа до расчетных значений. Таким образом, каждый смесительный элемент является минигазогенератором. Завершение рабочего процесса – перемешивание струй из минигазогенераторов происходит в общей камере газогенератора минимальных размеров.

При разработке газогенератора были реализованы следующие мероприятия:

1. Использование фланцевого разъема для обеспечения мобильности в отработке и оптимизации параметров смесительных элементов.

На этапе проектных работ были рассмотрены два варианта фланцевого разъема:

– фланцевый разъем между газогенератором и статором турбины. Данное конструктивное решение с успехом было реализовано при отработке схем смесеобразования и балластировки доводочных газогенераторов двигателя 11Д43 и его модификации;

– фланцевый разъем между смесительной головкой и корпусом газогенератора. Это конструктивное решение также дало положительный результат при отработке и даже на первом этапе товарных поставок двигателей РД171.

При сопоставлении вышеуказанных вариантов наиболее выигрышным оказался вариант с фланцевым разъемом между СГ и корпусом. При практически одинаковых массо-габаритных характеристиках он имеет неоспоримые преимущества:

– существенно более высокую надежность, так как герметичность обеспечивается по жидкому кислороду, а не по высокотемпературному генераторному газу;

– возможность исследования различных вариантов смесеобразования в составе смесительной головки, а не газогенератора;

– возможность замены смесительных головок непосредственно на огневом стенде.

2. Выполнение силовой сферической оболочки методом точения, обеспечивающим получение по всему силовому контуру расчетных толщин, включая зоны сварки и, как следствие, стабильность прочностных характеристик.

Кроме этого, в плане повышения надежности при эксплуатации, закрепление силовой оболочки осуществляется сваркой встык без подкладок, являющихся возможными концентраторами загрязнений.

3. Уменьшение, по сравнению с газогенераторами двигателей РД171М и РД180, расхода кислорода по тракту охлаждения, позволившее несколько снизить среднюю температуру генераторного газа и, что более важно, значительно уменьшить разницу температуры генераторного газа в пристеночном слое и в ядре потока.

Этапы отработки газогенератора

1. Одним из основных требований к конструкции газогенераторов является обеспечение однородности температурного поля генераторного газа.

Для этого необходимо равномерно распределить расходы окислителя и горючего через форсунки по всей площади смесительной головки. Это требование может быть обеспечено благодаря конструктивным решениям по смесительной головке и специальной доводке гидравлических характеристик форсунок.

Однако обеспечение одинаковых расходов через форсунки при проливке может не дать положительного эффекта, так как существенные отличия в их расходные характеристики могут внести места расположения форсунок из-за потери давления по трактам подвода компонентов.

Основные сложности возникают при распределении окислителя. Можно выделить два вида неравномерности распределения – окружную и радиальную.

Окружная неравномерность обусловлена растеканием окислителя по коллектору. По опыту создания газогенераторов различных ЖРД для обеспечения приемлемой неравномерности рекомендуется скорость окислителя в отверстиях перепуска выдерживать равной 20...40 м/с, при этом максимальная окружная скорость составляет 15...25 м/с.

Обеспечить радиальную равномерность распределения окислителя по площади смесительной головки более сложная задача. Окислитель проходит между форсунками каждого ряда от периферии к центру, ответвляясь для "запитки" каждой форсунки. Все форсунки, за исключением центральной, работают в условиях транзита компонента на их входе.

Для обеспечения радиальной равномерности распределения расхода окислителя в соответствии с методикой [1] были спроектированы форсунки трех классов, отличающиеся расходами:

в ядре – 19 форсунок с условным расходом 1;

в предпериферии – 18 форсунок с условным расходом 1,01 (увеличение расхода на 1%);

в периферии – 24 форсунки с условным расходом 1,05 (увеличение расхода на 5%).

Обеспечение равномерности распределения второго компонента – горючего особых сложностей не вызывает. Центральный подвод и система каналов индивидуального подвода исключают транзит компонента на входе в форсунку, и введение "классности" форсунок по горючему не требуется.

Контроль распределения компонентов по площади спроектированной смесительной головки проводился при проливках:

– по тракту окислителя расходами 125 и 200 кг/с;

– по тракту горючего расходами 4,7 и 7,0 кг/с.

При проливках замерялся расход через каждую форсунку. Количество одновременно подсоединяемых расходомерных устройств было не более четырех при каждом включении; расход через центральную форсунку постоянно контролировался.

Сравнение результатов проливок показало, что отклонения лежат в достаточно узком интервале ($-2,6\% \dots +3,1\%$), а используемая методика позволяет на этапе проектирования газогенератора обеспечивать высокую радиальную равномерность распределения избыточного компонента по площади смесительной головки.

Оценка ожидаемой неравномерности температурного поля газогенератора велась путем обработки данных проливок, а также результатов, полученных расчетным путем. Расчет базируется на использовании степенной зависимости температуры продуктов генерации от массового соотношения компонентов топлива в газогенераторе:

$$T_{\text{ПГ}} = a \cdot K_m^b,$$

где $T_{\text{ПГ}}$ – температура продуктов генерации, К;

K_m – массовое соотношение компонентов топлива (отношение массовых расходов окислителя и горючего);

a, b – расчетно-экспериментальные коэффициенты.

Эта формула получена путем аппроксимации результатов стандартных термодинамических расчетов с учетом опытно-экспериментальных данных, полученных в НПО Энергомаш при доводке семейства кислородно-керосиновых двигателей.

Среднемассовая и средняя по окружному ряду форсунок температуры продуктов сгорания определялись по следующим формулам:

$$T_{\text{ср.СГ}} = 25643 \cdot K_{m \text{ СГ}}^{-0,87711}$$

$$T_{\text{ср.р}} = 25643 \cdot K_{m \text{ р}}^{-0,87711},$$

где $T_{\text{ср.СГ}}$ – ожидаемое среднее значение температуры продуктов сгорания (на номинальном режиме), К;

$T_{\text{ср.р}}$ – ожидаемое среднее значение температуры продуктов сгорания по ряду (на номинальном режиме), К;

$K_{m \text{ СГ}}$ и $K_{m \text{ р}}$ – соотношение компонентов по смесительной головке и по ряду соответственно.

Расчет относительных радиальных неравномерностей температурного поля проводился по формуле:

$$\bar{T}_{\text{рад}} = \frac{T_{\text{ср.р}} - T_{\text{ср.СГ}}}{T_{\text{ср.СГ}}} \cdot 100,$$

где $\bar{T}_{\text{рад}}$ – ожидаемая радиальная неравномерность температурного поля, %.

Ожидаемые значения соотношений компонентов, температур продуктов сгорания для каждой форсунки, а также их отклонения от среднемассовой температуры определялись по приведенным ниже формулам:

$$K_{mi} = \frac{\dot{m}_{\Phi i, O}}{\dot{m}_{\Phi i, \Gamma}} \bigg/ \frac{\dot{m}_{\Phi \text{СГ}, O}}{\dot{m}_{\Phi \text{СГ}, \Gamma}} \cdot K_{m, \text{СГ}, \text{н}};$$

$$T_{\Phi i} = 25643 \cdot K_{mi}^{-0,87711};$$

$$\bar{T}_{\Phi i} = \frac{T_{\Phi i} - T_{\text{срСГ}}}{T_{\text{срСГ}}} \cdot 100,$$

где $T_{\Phi i}$ – ожидаемая температура продуктов сгорания для i -той форсунки, К;

$K_{m, \text{СГ}, \text{н}}$ – соотношение компонентов в смесительной головке для номинального режима;

K_{mi} – соотношение компонентов в i -той форсунке для номинального режима;

$\dot{m}_{\Phi i, O}$ – значение расхода по тракту окислителя i -той форсунки;

$\dot{m}_{\Phi i, \Gamma}$ – значение расхода по тракту горючего i -той форсунки;

$\bar{T}_{\Phi i}$ – ожидаемое отклонение температуры продуктов сгорания от среднемассовой, %.

Ожидаемая окружная неравномерность и максимальная неравномерность температурного поля смесительной головки рассчитываются по следующим формулам:

$$\bar{T}_{\text{окр}} = \left(\frac{T_{\text{max, п}} - T_{\text{min, п}}}{T_{\text{ср, п}}} \right) \cdot 100 ;$$

$$\bar{T}_{\text{max, СГ}} = \left(\frac{T_{\text{max, СГ}} - T_{\text{min, СГ}}}{T_{\text{ср, СГ}}} \right) \cdot 100,$$

где $\bar{T}_{\text{окр}}$ – величина окружной неравномерности температурного поля;

$T_{\text{min, п}}$ – минимальная температура по окружному ряду форсунок;

$T_{\text{max, п}}$ – максимальная температура по окружному ряду форсунок;

$T_{\text{min, СГ}}$ – минимальная температура по смесительной головке;

$T_{\text{max, СГ}}$ – максимальная температура по смесительной головке;

$\bar{T}_{\text{max, СГ}}$ – величина максимальной неравномерности по смесительной головке.

Значения основных ожидаемых параметров равномерности температурного поля лежат в следующих пределах:

$\bar{T}_{\text{рад}}$ – от –3,9% до 1,6% ;

$\bar{T}_{\text{окр}}$ – от –3,8% до 6,3% ;

\bar{T}_{max} – от –4,3% до 8%.

Анализ результатов расчетов показывает, что наибольшая температура продуктов газогенерации имеет место в периферийном ряду – ожидаемая разность между максимальной темпе-

ратурой на выходе из форсунки и среднемассовой составляет ~ 70°C.

Сравнение этих величин с аналогичными величинами для газогенератора двигателя РД180 (~145°C) позволяет сделать вывод, что равномерность температурного поля продуктов газогенерации для однокамерного двигателя существенно выше, чем для ранее разработанного двигателя РД180.

Следует отметить, что ожидаемое температурное поле продуктов газогенерации рассчитывалось в сечении непосредственно у смесительной головки. При наличии газового тракта (≥ 500 мм от смесительной головки до соплового аппарата турбины) можно ожидать существенного выравнивания температур к входу в сопловой аппарат турбины за счет турбулентного перемешивания и процессов тепло- и массообмена.

2. При отработке однокамерного двигателя было принято решение о разработке модельной установки для исследования рабочего процесса в газогенераторе.

Особо настораживала работа двигателя на режиме 30% номинальной тяги, где параметры газогенератора таковы, что могут появиться проблемы, связанные с устойчивостью протекающих в нем процессов.

Конструкция модельной установки представлена на рис. 2.

Камера установки состоит из охлаждаемых проставок, двух замерных шайб, подпорной шайбы с соплом критического перепада, последовательно состыкованных между собой с помощью фланцевых разъемов. К камере модельной установки пристыковывается специально спроектированная смесительная головка. Особенностью конструкции смесительной головки является ее разборность. Конструкция позволяет без расстыковки "горячих" стыков установки и кислородной магистрали менять "начинку" головки в условиях стенда. Возможны замены огневого днища, форсунки, а также установка либо однофорсуночного, либо трехфорсуночного варианта головки.

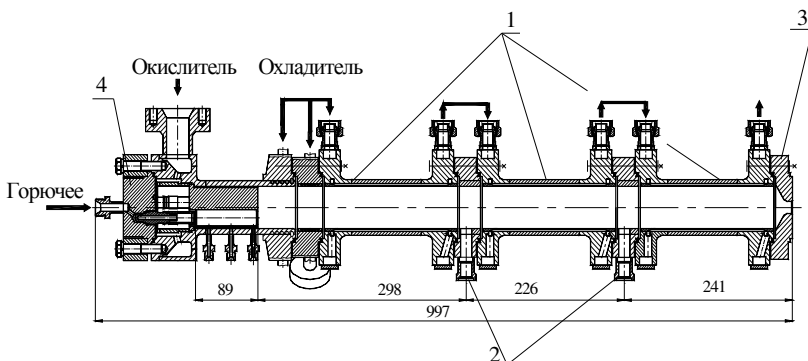


Рис. 2. Модельная установка с трехфорсунной головкой:
 1 – охлаждаемые проставки; 2 – измерные шайбы; 3 – сопло критического перепада; 4 – смешительная головка. Размеры даны в мм

Предусмотрены стендовые замеры расходов, температуры и давления компонентов топлива и охладителя, а также пульсаций окислителя на входе и подогревов охладителя после каждой охлаждаемой проставки.

Испытания проводились в НПО Энергомаш на стенде с вытеснительной системой подачи. До начала испытаний предполагалось оснастить стенд системой подачи жидкого кислорода.

Однако стенд не был доработан и испытания проводились с использованием газообразного кислорода.

Основные задачи испытаний следующие:

- проверка работоспособности испытываемой матчасти и возможностей стенда в максимально широком интервале режимных параметров;
- отработка методики анализа полученных результатов, уточнение гидравлических, тепловых, термодинамических и других расчетов;
- частные задачи (оценка завершенности процесса в смешительном элементе, оценка перепада давления на жиклере огневого днища и т. п.).

Было проведено 20 испытаний однофорсуночных и трехфорсуночных смесительных головок при давлении 100...170 кгс/см² и соотношении компонентов (K_m) 60...500. Интервал достигнутых температур продуктов газогенерации – от рекордно низкой ~ 80° С до рекордно высокой ~ 760° С (заданный по ТЗ интервал температур в газогенераторе однокамерного двигателя – от ~ 84° С до 648° С). Интервал реализованных относительных расходонапряженностей камеры составлял $(0,6 \dots 4,3) \cdot 10^{-3} \text{ (кг/сек} \cdot \text{см}^2) \cdot \text{(кг/см}^2\text{)}^{-1}$. У газогенератора однокамерного двигателя максимальная относительная расходонапряженность реализуется на режиме 30% номинальной тяги и не превышает $3 \cdot 10^{-3} \text{ (кг/сек} \cdot \text{см}^2) \cdot \text{(кг/см}^2\text{)}^{-1}$. Испытаниям подвергался исходный вариант смесительного элемента.

На всех режимах работы установки не было отмечено существенных пульсаций давления продуктов газогенерации и окислителя на собственных акустических частотах камеры сгорания (амплитуда их не превысила 0,3% давления в камере), что позволяет говорить об устойчивости рабочего процесса. Дефектов материальной части, таких как подгар "носиков" форсунок, эрозии материала внутреннего днища, не отмечено.

Анализ замеров температур продуктов сгорания показывает, что уже к первой замерной шайбе поток имеет достаточно равномерное поле температур. Следует отметить, что для уменьшения искажения потока в каждой замерной шайбе было установлено по три корпусные термопары с внедрением в поток на 4, 14 и 24 мм соответственно (радиус камеры 27,5 мм). При испытаниях однофорсуночной и трехфорсуночной смесительных головок разность показаний второй и третьей термопары первой замерной шайбы не превышала 12,7°С...21,6°С, а в процентах 2,9%...4,6%.

В условиях модельной установки, когда значительная часть тепла отнимается у потока автономным охладителем и, кроме того, входная температура избыточного компонента (газообраз-

ного кислорода) от испытания к испытанию меняется, сравнительная оценка совершенства рабочего процесса различных вариантов смесительных головок и элементов смесеобразования проводилась по так называемой, приведенной температуре продуктов газогенерации ($t_{\Gamma\Pi}$).

Расчет приведенной температуры проводился по формуле:

$$t_{\Gamma\Pi} = t_{\Gamma I} + \frac{C_B \Delta t_B \cdot \dot{m}_B + C_{P_o} \Delta t_o \dot{m}_o}{C_{P_r} \cdot \dot{m}_T}, \quad (1)$$

где $t_{\Gamma I}$ – средняя температура продуктов газогенерации в районе первой замерной шайбы;

C_{P_o} , C_{P_r} – теплоемкость при постоянном давлении газообразного кислорода и продуктов газогенерации соответственно;

C_B – теплоемкость воды;

\dot{m}_o , \dot{m}_B , \dot{m}_T – расходы окислителя, воды и продуктов газогенерации соответственно;

$\Delta t_o = (20 - t_{\text{Овх}})$, °С;

$t_{\text{Овх}}$ – температура окислителя на входе в смесительную головку;

Δt_B – подогрев воды в трактах охлаждения установки до первой замерной шайбы.

Результаты расчетов $t_{\Gamma\Pi}$, проведенных по формуле (1) для всех испытаний, представлены на рис. 3.

Массивы полученных значений $t_{\Gamma\Pi}$, °С были аппроксимированы следующей степенной зависимостью:

$$t_{\Gamma\Pi} = 32571 K_m^{-0,9483}.$$

Значения приведенной температуры продуктов газогенерации практически не отличаются для одно- и трехфорсуночных смесительных головок и от испытания к испытанию, и близки к расчетной температуре для газообразного кислорода.

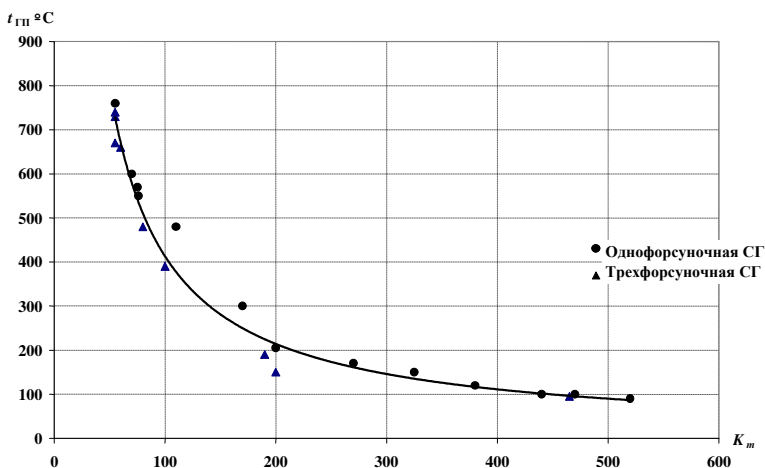


Рис. 3. Зависимость температуры продуктов генерации от соотношения компонентов

Исследования в составе модельной установки подтвердили широкие возможности форкамерного принципа смесеобразования в сочетании с локализацией процессов в утолщенном днище.

Испытания исходного варианта форсунки были продолжены в составе двигателя на жидком кислороде и при номинальном значении давления в газогенераторе.

3. Задачи по отработке смесительной головки были следующие:

- оптимизация параметров исходного варианта форсунки;
- оптимизация геометрии послефорсуночного канала в утолщенном днище;
- набор статистики по испытаниям выбранного варианта смесеобразования в широком диапазоне режимных параметров.

Для оптимизации параметров двухкомпонентной форсунки форкамерного типа (рис. 4) было спроектировано, изготовлено и исследовано три ее варианта.

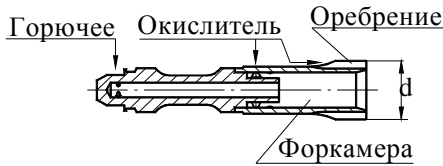


Рис. 4. Двухкомпонентная форсунка

Первый вариант: форсунки имеют диаметр по оребрению – $d = 21$ мм, массовое соотношение компонентов в форкамере $K_{\text{фор.}} = 12,7$ ($T_{\text{фор}} \sim 2200\text{К}$).

Второй вариант : форсунки имеют диаметр по оребрению – $d = 20$ мм, массовое соотношение компонентов в форкамере $K_{\text{фор.}} = 11,2$ ($T_{\text{фор}} \sim 2450\text{К}$).

Третий вариант: форсунки имеют диаметр по оребрению – $d = 21$ мм, массовое соотношение компонентов в форкамере $K_{\text{фор.}} = 9,8$ ($T_{\text{фор}} \sim 2700\text{К}$).

Оптимизация геометрии послефорсуночного канала происходила также по сопоставлению результатов испытаний различных вариантов конфигурации каналов (рис. 5):

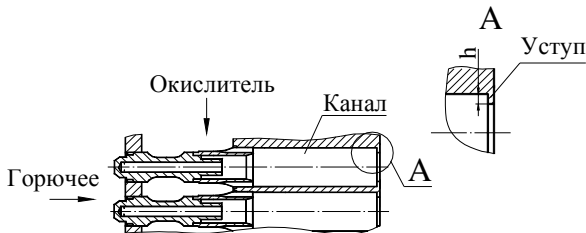


Рис. 5. Двухкомпонентная форсунка с послефорсуночным каналом. Варианты: 1. С уступом на выходе – $h = 2$ мм; 2. С уступом на выходе – $h = 1$ мм; 3. Без уступа на выходе – $h = 0$ мм

Фланцевый разъем в конструкции газогенератора позволил на трех двигателях при восьми испытаниях проверить все вышеприведенные варианты по смесеобразованию и выбрать штатный, по результатам анализа параметров устойчивости рабочего процесса: форсунки с диаметром по оребрению – 21 мм; массовое соотношение компонентов – 12,7; уступ на выходе – 1 мм (Ø19 мм).

Особое внимание на этом этапе отработки было обращено на завершенность рабочего процесса и виброакустические характеристики быстроменяющихся параметров газогенератора на режимах глубокого дросселирования (27...30% тяги двигателя).

На этих режимах температура генераторного газа снижается до 80°C, и обеспечение полного сгорания керосина с жидким кислородом с температурой 140К (бессажевый режим горения) представляет собой сложную задачу.

Успешное ее решение было достигнуто применением двухкомпонентных форсунок форкамерного типа с последующим подмешиванием избыточного компонента в послефорсуночном канале огневого днища.

На режиме дросселирования внутри форсунки сохраняется высокотемпературный факел (1500 К), который и обеспечивает полное сгорание керосина. Подмешивание избыточного кислорода не вызывает особых проблем и позволяет снижать температуру факела до 80°C и ниже.

Допустимые нормы по виброакустическим характеристикам газогенератора на этом режиме по пульсациям давления не превышают норм для номинального режима работы двигателя, а по осевым и поперечным вибрациям конструкции в 2...4 раза ниже.

Выводы

1. На основе многолетнего опыта по разработке окислительных газогенераторов для ЖРД, выполненных по замкнутой схеме с различным уровнем тяги, создана оригинальная методи-

ка поэтапной обработки, обеспечивающей высокую надежность, сокращенные сроки и стоимость.

2. Использование уникальной схемы смесеобразования и поэтапная обработка позволили всего на трех двигателях при восьми испытаниях оптимизировать конструкцию газогенератора.

3. Разработанная конструкция обладает необходимой работоспособностью и приемлемыми параметрами по устойчивости рабочего процесса в широком диапазоне изменения тяги двигателя – 105 ... 27% от номинала.

Литература

1. *Аджян А. П., Егоров А. В.*. Обеспечение равномерности температурного поля в окислительном газогенераторе //Труды НПО Энергомаш М., 2001. № 19. С. 101–113.

Поступила 16.02.2010г.