

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический
университет»

Кафедра «Ракетные двигатели»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

и контрольные задания к курсовому проекту по дисциплине
«Конструирование камер жидкостных ракетных двигателей»
для студентов специальности 160700.65, 24.05.02
«Проектирование авиационных и ракетных двигателей» очной
формы обучения

Воронеж 2015

Составители: д-р техн. наук Г.И. Скоморохов
канд. техн. наук А.А. Гуртовой

УДК 621.454

Методические указания и контрольные задания к курсовому проекту по дисциплине «Конструирование камер жидкостных ракетных двигателей» специальности 160700.65, 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» очной формы обучения / ФГБОУ ВПО "Воронежский государственный технический университет"; сост. Г.И. Скоморохов, А.А. Гуртовой. Воронеж, 2015. 31 с.

Разработанные методические указания предназначены для студентов, выполняющих лабораторный практикум по дисциплине «Конструирование камер жидкостных ракетных двигателей».

Рецензент: д-р техн. наук А.Ф. Ефимочкин.

Ответственный за выпуск зав. кафедрой д-р техн. наук проф. В.С. Рачук

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета.

© ФГБОУ ВПО "Воронежский
государственный технический
университет", 2015

Основные сокращения, условные обозначения и индексы

С о к р а щ е н и я

БД – база данных;
ГГ – газогенератор;
ДУ – двигательная установка;
ЖРД – жидкостный ракетный двигатель;
ЖРДУ – жидкостная ракетная двигательная установка;
КС – камера сгорания;
ЛА – летательный аппарат;
РД – ракетный двигатель;
РТ – рабочее тело;
ТНА – турбонасосный агрегат.

У с л о в н ы е о б о з н а ч е н и я

A – геометрическая характеристика центробежной форсунки;
 D, d – диаметр;
 F – площадь;
 f – удельная площадь;
 \bar{F} – относительная площадь сечения камеры;
 H – шаг между форсунками;
 I_y – удельный импульс тяги;
 K_m – массовое действительное соотношение компонентов;
 K_m^o – массовое стехиометрическое соотношение компонентов;
 L, l – длина;
 m – масса;
 \dot{m} – массовый расход;
 N – мощность;
 n – средний показатель изоэнтропы расширения, число форсунок;
 P – тяга;
 p – давление;

R_o, R – универсальная и удельная газовые постоянные соответственно;
 r – радиус;
 T – температура;
 φ – коэффициент заполнения жидкостью сопла форсунки на выходе;
 φ_1 – коэффициент удельного импульса;
 φ_k – коэффициент камеры сгорания;
 φ_c – коэффициент сопла;
 W – скорость рабочего тела;
 Z – степень укорочения сопла;
 α – угол;
 $\alpha_{ок}$ – коэффициент избытка окислителя;
 β – расходный комплекс, угол;
 ε – степень расширения рабочего тела в сопле;
 λ – приведённая скорость;
 μ – коэффициент расхода, молярная масса;
 π_T – степень расширения газа в турбине;
 ρ – плотность;
 σ_f – коэффициент восстановления полного давления;
 τ – время;
 ξ – коэффициент потерь удельного импульса тяги.

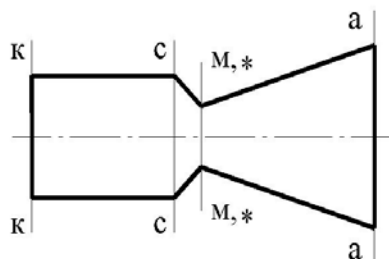
И н д е к с ы

а – выход из сопла;
вд – высокое давление;
вх – вход;
вых – выход;
г – горючее;
газ – газовый;
гг – газогенератор;
ж – жидкость;
з – завеса;
ид – идеальный;
к – камера или вход в камеру;

кз – камера закручивания;
маг – магистраль;
н – насос, атмосферный;
ок – окислитель;
о – параметр торможения;
опт – оптимальный;
п – в пустоте;
пр – пристенок;
р – расчётный;
с – вход в сопло;
ср – среднее значение;
ст – стенка;
т – турбина;
ф – форсунка;
я – ядро.

Сечения камеры

к – вход в камеру;
с – вход в сопло;
м – минимальное сечение сопла;
* – критическое сечение сопла;
а – выход из сопла.



1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СМЕСИТЕЛЬНОЙ ГОЛОВКИ КАМЕРЫ

1.1. Выбор формы, типа и конструктивной схемы смесительной головки

Смесительная головка является главным элементом камеры ЖРД, обеспечивающим хорошую организацию смесеобразования в камере сгорания.

При проектировании смесительной головки камеры должны быть выбраны форма, тип и конструктивная схема головки, осуществлено необходимое размещение и надёжное крепление выбранного типа форсунок, выполнен удобный подвод компонентов к форсункам и обеспечена высокая технологичность смесительной головки.

Выбирая форму и тип смесительной головки камеры проектируемого ЖРД, следует руководствоваться положениями и конкретными рекомендациями, изложенными в лекциях по учебной дисциплине «Теория, расчёт и проектирование ракетных двигателей», а также в [2] (глава III), в [4] (глава XIII), в [9] (главы VII и VIII) и в [5] (глава VIII). В настоящем учебном пособии даны лишь некоторые упрощённые рекомендации по принятию перечисленных проектных решений.

Конкретный выбор формы и типа смесительной головки камеры в основном зависит от размерности двигателя, его абсолютных и удельных параметров, традиции той или иной проектирующей организации, накопленного разработчиками опыта создания двигателя-прототипа. При выполнении проектных расчётов выбор формы и типа смесительной головки камеры должен быть обязательно согласован с руководителем курсового или дипломного проектирования.

Принципиально различными по конструкции являются смесительные головки двигателей, работающих без дожигания и с дожиганием генераторного газа. В первом случае согласно агрегатному состоянию компонентов топлива смесительные головки являются жидкофазными, а во втором – жидкогазофазными или газофазными. Газофазные смесительные головки используются в ЖРД с дожига-

нием генераторного газа и схемой организации рабочего процесса в камере типа «газ – газ».

Смесительные головки камер ракетных двигателей по форме бывают:

- *плоские;*
- *шатровые;*
- *сферические.*

Несколько типичных схем жидкофазных плоских смесительных головок приведено на рис. 1.

Плоские смесительные головки являются наиболее распространёнными. Преимущество плоских головок заключается в простоте конструкции. При этом они обеспечивают достаточно хорошую однородность полей скоростей, соотношения компонентов и расходонапряжённости по поперечному сечению камеры сгорания.

Недостатком плоских смесительных головок является их относительно небольшая прочность и малая жёсткость. Поэтому в камерах ЖРД большой размерности необходимо предусмотреть в смесительных головках подкрепляющие элементы, обеспечивающие требуемую прочность и жёсткость.

Среди плоских смесительных головок большое распространение в маршевых ЖРД получили головки с двойным дном (см. рис. 1, *a*). Конструктивная схема такой жидкофазной плоской смесительной головки с двойным дном и однокомпонентными форсунками показана на рис. 2.

Окислитель из проточной части охлаждающего тракта камеры поступает в полость смесительной головки между средним 2 и огневым 3 днищами. Отсюда через центробежные шнековые форсунки 6 окислитель поступает в камеру сгорания. Горючее через входной патрубок поступает в полость смесительной головки, образованную наружным 1 и средним 2 днищами, а оттуда через центробежные форсунки 5 подается в камеру сгорания.

Форсунки крепятся к среднему и огневому днищам смесительной головки развальцовкой. Смесительная головка соединяется с камерой сгорания при помощи соединительного кольца 4, а также непосредственно сваркой с внутренней огневой стенкой 8 камеры сгорания.

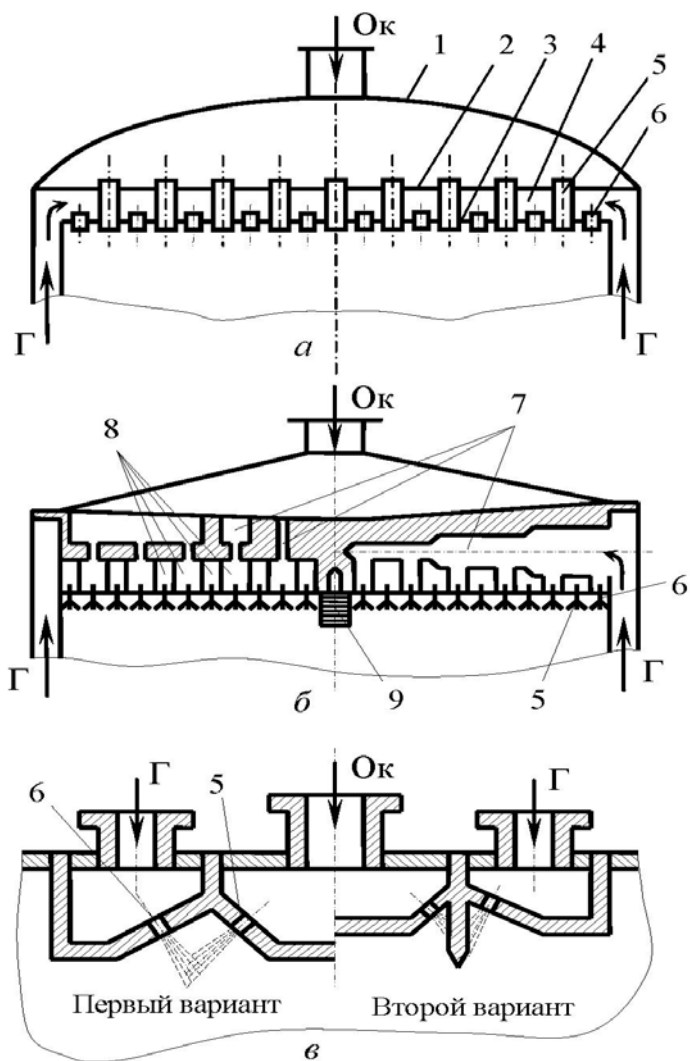


Рис. 1. Схемы жидкофазных плоских смешивательных головок:
a – с двойным дном; *б* – со сверлениями; *в* – с пересекающимися
 струями окислителя и горючего;
 1 – верхнее днище; 2 – среднее днище; 3 – огневое, или нижнее днище;
 4 – полость охладителя; 5 – форсунка окислителя; 6 – форсунка
 горючего; 7 – каналы сверления; 8 – кольцевые коллекторы;
 9 – воспламенительное устройство

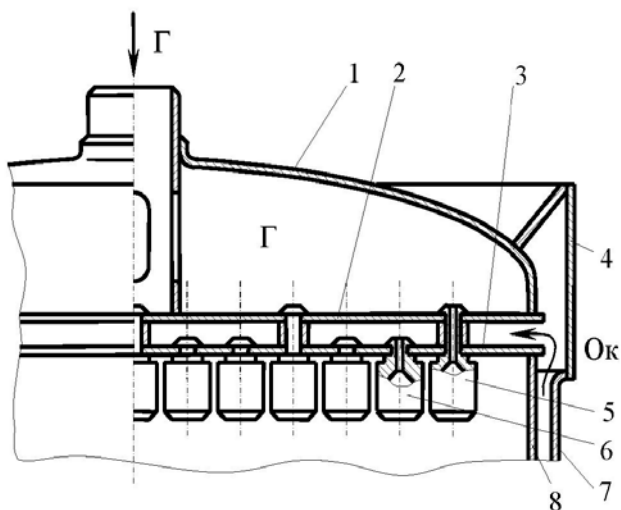


Рис. 2. Жидкофазная плоская смешительная головка с двойным дном и однокомпонентными форсунками:
 1 – верхнее, или наружное днище; 2 – среднее днище;
 3 – огневое, или нижнее днище; 4 – соединительное кольцо;
 5 – форсунка горючего; 6 – форсунка окислителя; 7 – корпус камеры; 8 – огневая стенка камеры

Некоторые схемы жидкофазных и жидкогазофазных сферических смешительных головок показаны на рис. 3.

Достоинство сферических смешительных головок заключается в жёсткости их конструкции, поэтому они нашли применение преимущественно в ЖРД большой размерности, т.е. больших тяг.

На рис. 3, а показана схема сферической жидкогазофазной смешительной головки с двойным дном и двухкомпонентными форсунками с внешним смешением. Головка предназначена для несамовоспламеняющихся компонентов топлива, поэтому имеет воспламенительное устройство 2 для топливной смеси в камере сгорания при запуске двигателя. Оно расположено на смешительной головке по её оси.

Схема сферической жидкофазной смешительной головки с двухкомпонентными форсунками с внешним смешением изображена на

рис. 3, б. Эта головка предназначена для самовоспламеняющихся компонентов топлива, т.к. не имеет воспламенительного устройства.

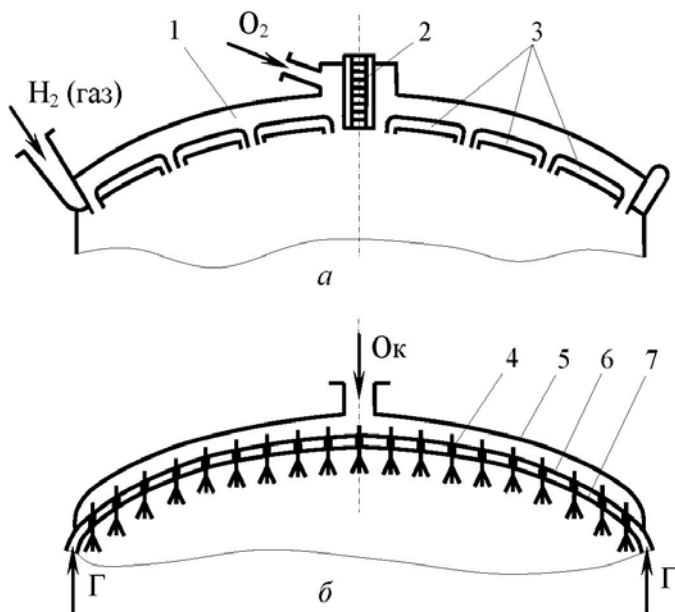


Рис. 3. Схемы сферических смесительных головок:

а – жидкогогазофазной с двойным дном; *б* – жидкофазной с двухкомпонентными форсунками;

- 1 – полость жидкого кислорода; 2 – воспламенительное устройство;
 3 – кольцевые полости газообразного водорода; 4 – двухкомпонентные жидкостные форсунки; 5 – верхнее днище; 6 – среднее днище;
 7 – огневое, или нижнее днище

Шатровые смесительные головки напоминают по форме шатёр (см. рис. 4). Они находят применение в маршевых ЖРД средних и малых тяг или в качестве предкамер.

К преимуществам шатровой головки следует отнести её повышенную прочность и бóльшую по сравнению с плоскими головками поверхность для размещения форсунок. Недостатком шатровых головок является сложность их изготовления и неравномерность расходонапряжённости в поперечном сечении камеры. В этих головках

может происходить образование «жгута» распыленной топливной смеси.

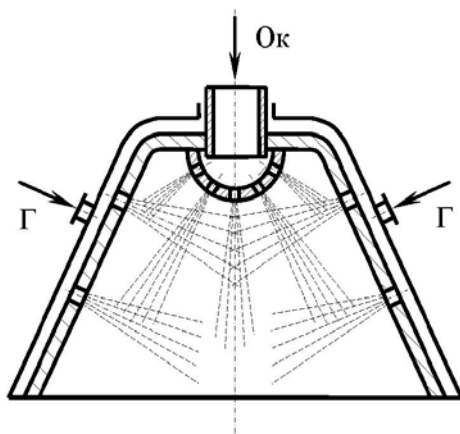


Рис. 4. Схемы шатровой жидкофазной смесительной головки с центральным подводом окислителя

цевой поток газа через струйные форсунки 4, выполненные в виде отверстий в огневой стенке камеры сгорания и в огневом сферическом днище головки. Если две различные жидкостные полости используются для подачи окислителя и горючего, то эти схемы жидкогазофазных смесительных головок могут применяться в ЖРД, где один из компонентов газифицируется частично.

На рис. 5, б изображена схема жидкогазофазной смесительной головки с радиальным смесителем, отличающаяся тем, что газообразный компонент на входе в камеру сгорания распределяется равномерно по всему её поперечному сечению, после чего осуществляется впрыск жидкого компонента через отверстия смесителя той или иной формы. По сравнению со схемой, приведённой на рис.5, а, преимущество этой схемы заключается в более равномерном распределении по сечению камеры как газообразного, так и жидкого компонентов топлива.

Недостатком схемы смесительной головки с радиальным расположением смесителей (см. рис. 5, б) является трудность обеспечения равномерной расходонапряженности по всему поперечному сечению смесительной головки, особенно в периферийной её части.

Возможные конструктивные схемы жидкогазофазных смесительных головок приведены на рис. 5. На схеме а показана жидкогазофазная головки с открытой газовой полостью и кольцевым подводом газа. Это простейшая схема организации смешения в камере сгорания газообразного и жидкого компонентов топлива. Генераторный газ выходит из турбины ТНА 1 непосредственно в камеру сгорания, а жидкий компонент впрыскивается в кольцевой

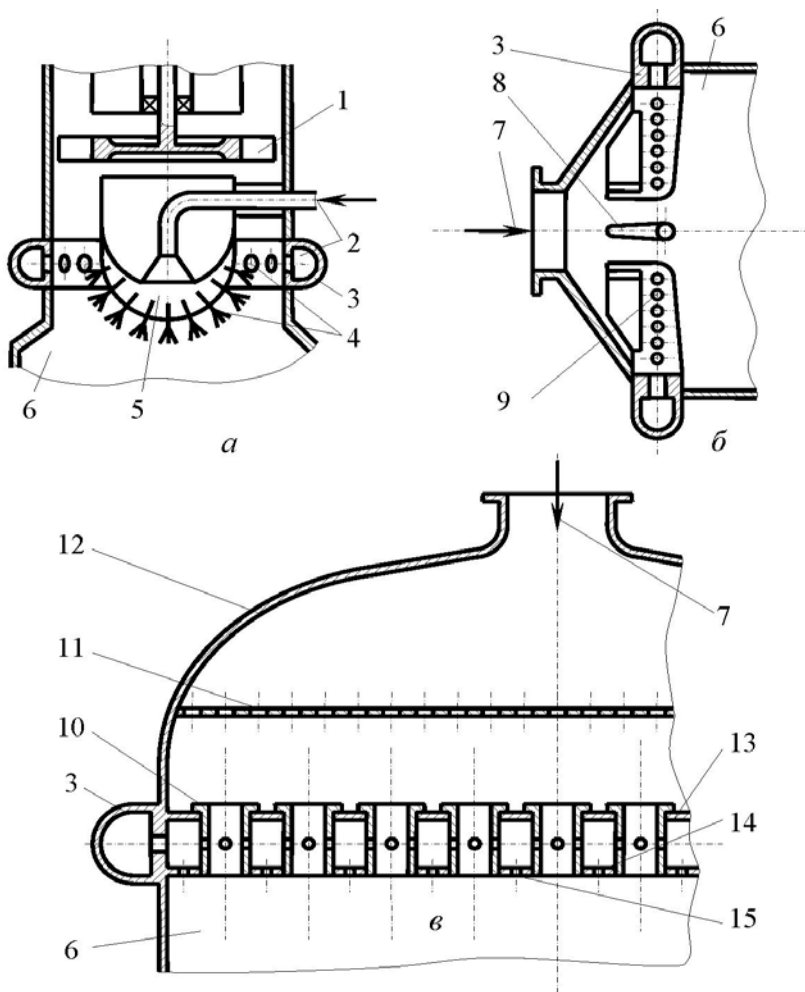


Рис. 5. Жидкогазофазные смесительные головки:

а – с открытой газовой полостью и кольцевым подводом газа; *б* – с радиальным смесителем; *в* – со смесителем в виде перфорированного днища и двухкомпонентными форсунками;

1 – турбина ТНА; 2 – подвод жидкого компонента; 3 – кольцевой коллектор подвода жидкого компонента; 4 – форсунки; 5 – двустенное днище; 6 – камера сгорания; 7 – подвод генераторного газа; 8 – ребра; 9 – форсунки радиальных смесителей; 10 – двухкомпонентные струйно-струйные газожидкостные форсунки; 11 – газовая выравнивающая решётка; 12 – верхнее днище; 13 – среднее днище; 14 – огневое, или нижнее днище; 15 – струйные форсунки

На рис. 5, в показана плоская жидкогазофазная смесительная головка с двойным дном, двухкомпонентными струйно-струйными газожидкостными 10 и однокомпонентными струйными жидкостными форсунками 15. По двухкомпонентным форсункам с внутренним смешением генераторный газ и жидкий компонент подаются из соответствующих полостей головки в камеру сгорания. Двухкомпонентные форсунки располагаются на смесительной головке по концентрическим окружностям. Между ними также по концентрическим окружностям расположены дополнительно на огневом днище однокомпонентные струйные жидкостные форсунки.

В схеме смесительной головки, представленной на рис. 5, в, за счёт увеличения гидравлического сопротивления газовой магистрали достигается повышение устойчивости рабочего процесса по отношению к продольным колебаниям рабочего тела в КС. Однако при таком выполнении смесительной головки возникает необходимость в постановке между верхним и средним днищами газовой полости спрямляющей газовой решётки 11.

На рис. 6 приведена схема газожидкостной смесительной головки камеры ЖРД, имеющего два ТНА и два газогенератора – восстановительный и окислительный.

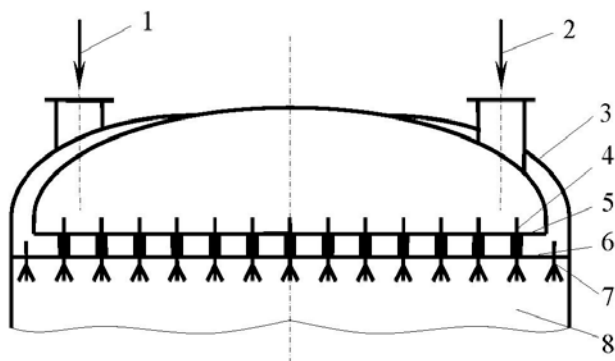


Рис. 6. Схема газожидкостной смесительной головки:
 1 – восстановительный генераторный газ из турбины первого ТНА; 2 – окислительный генераторный газ из турбины второго ТНА; 3 – верхнее днище; 4 – ядрная двухкомпонентная газовая форсунка; 5 – среднее днище; 6 – огневое, или нижнее днище; 7 – пристеночная однокомпонентная газовая форсунка; 8 – камера сгорания

Газофазные смесительные головки камер ЖРД, работающих по схеме «газ + газ» с дожиганием полностью газифицированных обоих компонентов топлива, пока не нашли широкого применения. Общие принципы их конструирования в основном совпадают с принципами создания газожидкофазных головок, в частности, по компоновке камеры и ТНА, по конструкции газопроводов, газовых полостей головки и системы её охлаждения.

Весьма компактными могут быть головки с закрытой газовой полостью, имеющие массивные днища с радиальными прорезями для газа и с трубчатыми форсунками для жидкого компонента [7].

Для предотвращения неустойчивой работы двигателя смесительные головки могут снабжаться антипульсационными перегородками. В этих случаях в схеме расположения форсунок на головке необходимо учитывать наличие таких перегородок, например, путём установки дополнительных форсунок горючего, образующих топливную завесу на перегородках. Перегородки могут быть образованы и отдельными «гребёнками» форсунок. Такие форсунки выполняются в виде трубок, выступающих от огневого днища в камеру сгорания на расстояние 50 мм и более.

Настоящий раздел пояснительной записки к курсовой работе должен содержать обоснованное принятие проектного решения по выбору формы, типа и конструктивной схемы смесительной головки камеры проектируемого ЖРД.

Пример.

Выбираем для проектируемого ЖРД жидкогазофазную смесительную головку. Это обусловлено тем, что проектируемый двигатель с дожиганием генераторного газа, и поэтому один компонент подается в КС в жидком виде, а другой – в газообразном.

По форме выбираем плоскую смесительную головку, т.к. она обеспечивает достаточно хорошую однородность полей скоростей, соотношения компонентов и расходонапряженности по поперечному сечению камеры сгорания и проста по конструкции.

По конструктивной схеме выберем плоскую смесительную головку с двойным дном как наиболее технологичную.

Итак, выбираем для камеры проектируемого ЖРД жидкогазофазную плоскую смесительную головку с двойным дном.

Можно изобразить схему выбранной смесительной головки и сослаться на этот рисунок.

1.2. Определение устройств, располагаемых на смесительной головке камеры

Необходимо выяснить какие устройства, кроме форсунок, требуется расположить на смесительной головке камеры ЖРД, чтобы предусмотреть для них места установки.

Для несамовоспламеняющихся компонентов топлива необходимо иметь воспламенительное (зажигательное) устройство, которое обеспечивает воспламенение топливной смеси в камере сгорания двигателя в момент его запуска. Это устройство чаще всего располагают на смесительной головке, предусмотрев ввод высокотемпературных продуктов сгорания через газопровод, установленный на месте одной из форсунок на огневом днище камеры.

На смесительной головке камеры могут располагаться топливные клапаны, датчики и сигнализаторы давления, регуляторы и другие агрегаты системы управления и регулирования двигателя.

1.3. Выбор типа форсунок

1.3.1. Выбирается тип форсунок для камеры в целом или для ядра потока, если организация пристеночного слоя предусмотрена схемой организации рабочего процесса в камере двигателя.

Форсунка является основным элементом смесительной головки камеры ЖРД.

Форсунка – это устройство, предназначенное для подачи (впрыска) в камеру сгорания ракетного двигателя или газогенератора компонентов топлива, их распыления, перемешивания и первоначального распределения по объёму камеры сгорания.

Форсунки, применяемые в ЖРД, классифицируют по следующим признакам:

1. Особенности устройства и конструкции:
 - *струйные;*
 - *центробежные;*
 - *целевые.*
2. Агрегатному состоянию подаваемых компонентов топлива:
 - *жидкостные;*
 - *газовые;*

- *газожидкостные.*
3. Числу компонентов, вводимых в КС одной форсункой:
- *однокомпонентные;*
 - *двухкомпонентные.*

Практически всё многообразие форсунок, применяемых в ракетных двигателях, представляет собой различные комбинации двух основных их типов струйных и центробежных.

Работа любой форсунки жидкого топлива характеризуется качеством распыла подаваемых в КС компонентов, который определяется следующими параметрами:

1. Тонкостью распыла, оцениваемой некоторым средним размером капель, получаемых в факеле распыла. Чаще всего используется медианный диаметр.

2. Однородностью распыла – диапазоном изменения размеров капель в факеле распылённого топлива. Чем меньше этот диапазон диаметров образовавшихся капель, тем однороднее распыл топлива.

3. Дальнобойностью факела – глубиной проникновения распыленного топлива в газовую среду.

4. Равномерностью расходонапряжённости, т.е. равномерностью распределения жидкости в факеле распыла.

5. Средним углом распыла $2\bar{\alpha}$, измеряемым у среза сопла форсунки.

Струйная форсунка выполняется либо в виде отверстия в днище смесительной головки или в стенке камеры сгорания, либо в виде трубки или цилиндрического насадка. Схемы различных видов струйных форсунок, применяемых в ЖРД, показаны на рис. 7.

Основными преимуществами струйных форсунок являются:

- простота их выполнения;
- большая пропускная способность смесительной головки со струйными форсунками, т. е. высокая расходонапряжённость камеры сгорания.

Струйных форсунок на смесительной головке постоянного диаметра можно разместить значительно больше, чем центробежных, и коэффициент расхода струйных форсунок в 2,5...3,0 раза больше, чем центробежных. Поэтому при одном и том же перепаде давления на форсунках смесительная головка со струйными форсунками обеспечивает бóльшую расходонапряжённость камеры.

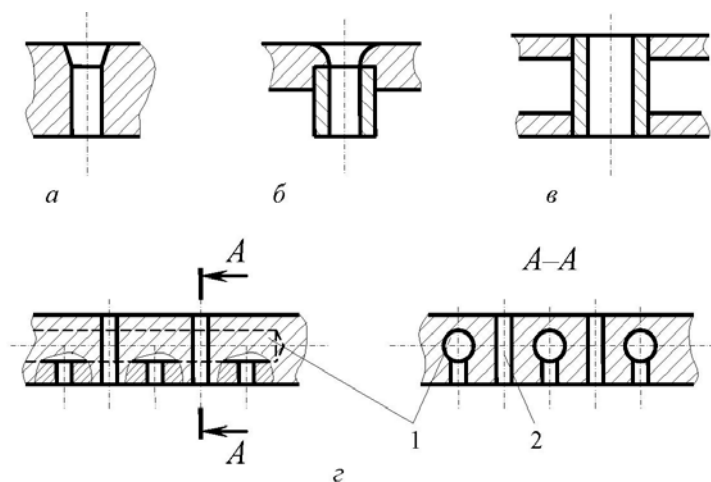


Рис. 7. Схемы различных видов струйных форсунок, применяемых в ЖРД;

a – отверстие в огневом днище смесительной головки; *б* – цилиндрический насадок; *в* – трубка; *z* – с каналами в днище для подвода компонентов; 1 – сверления для подачи окислителя; 2 – круглый или кольцевой канал для подачи горючего

Недостатками струйных форсунок являются:

- большая дальнобойность струи;
- малый угол распыла, составляющий $3 \dots 20^\circ$;
- недостаточная тонкость и однородность распыла компонента.

Камера, имеющая смесительную головку со струйными форсунками, получается более тяжёлой из-за необходимости иметь большую приведённую длину.

Более тонкий и однородный распыл можно получить, если струйные форсунки расположить так, чтобы их струи пересекались или натекали на преграду. Однако расходонапряжённость смесительных головок с такими форсунками несколько уменьшается. Схемы струйных форсунок с пересекающимися и натекающими на преграду струями показаны на рис. 8.

Струйные форсунки используются в жидкофазных и жидкогазофазных смесительных головках для подачи компонентов топлива как жидком, так и газовом агрегатном состоянии.

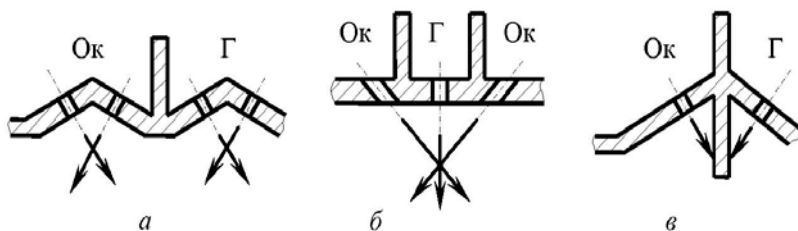


Рис. 8. Схемы струйных форсунок с пересекающимися и натекающими на преграду струями:

a – пересечение струй одного компонента; *б* – пересечение нескольких струй окислителя и горючего; *в* – натекание струй окислителя и горючего на экран

Широкое распространение получили струйные форсунки в жидкогазофазных смесительных головках для подачи в КС генераторного газа.

Центробежная форсунка отличается от струйной форсунки тем, что в ней рабочее тело получает предварительную закрутку. Вращение достигается либо за счёт тангенциального подвода рабочего тела в камеру закручивания, либо за счёт использования шнека, имеющего винтовую нарезку на наружной поверхности. Поэтому по способу получения закрутки потока компонента центробежные форсунки подразделяются:

- на *тангенциальные*,
- *шнековые*.

Центробежные форсунки по устройству подразделяются:

- на *открытые*,
- *закрытые*.

Открытые форсунки имеют диаметр сопла форсунки на выходе, равный диаметру камеры закручивания.

Схемы и конструктивные исполнения перечисленных типов центробежных форсунок приведены на рис. 9.

Основными преимуществами центробежных форсунок являются:

- более тонкий распыл компонентов;
- большая однородность распыла;

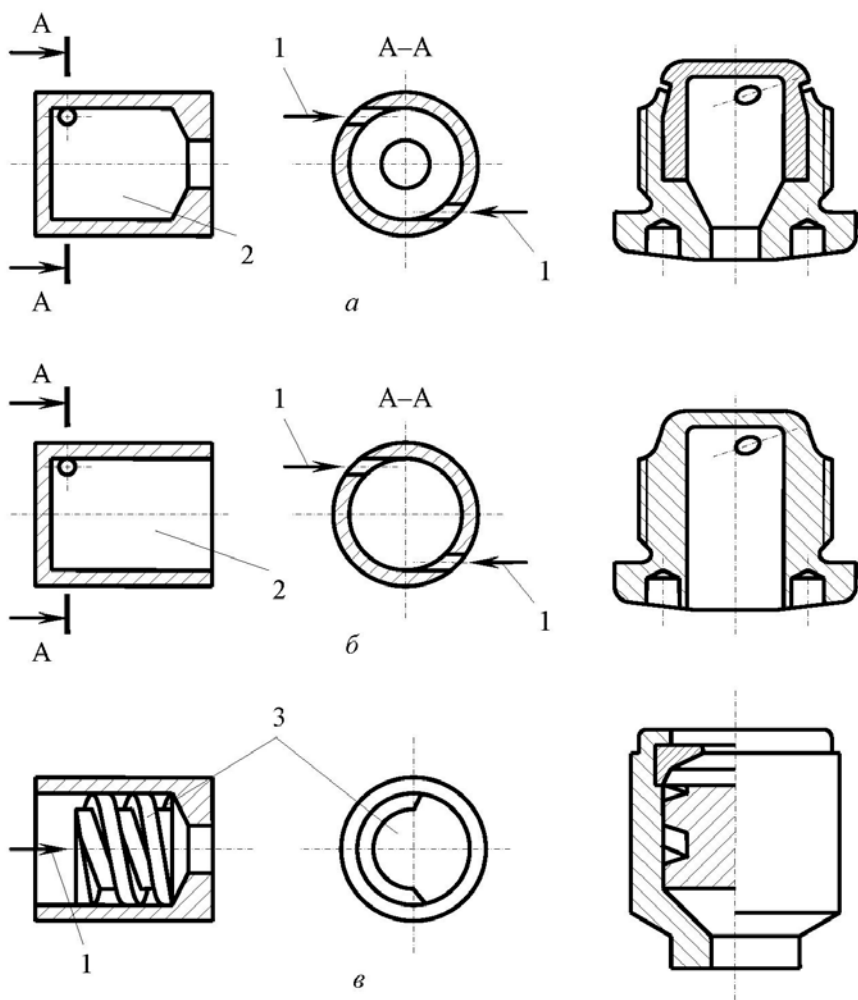


Рис. 9. Схемы и конструктивное исполнение центробежных форсунок:
a – тангенциальная закрытая; *б* – тангенциальная открытая; *в* – шнековая закрытая;
 1 – подача рабочего тела (жидкости или газа), 2 – камера закручивания; 3 – шнек

- меньшая дальность струи;
- высокие углы распыла, составляющие 30...120°

- более равномерная эпюра расходонапряжённости в факеле распыла.

Эти преимущества позволяют ускорить протекание подготовительных процессов в камере сгорания, а значит, уменьшить ее длину.

Центробежные форсунки имеют следующие основные недостатки:

- меньший коэффициент расхода центробежных форсунок по сравнению со струйными, поэтому низкая пропускная способность смесительной головки с центробежными форсунками, т.е. низкая расходонапряжённость камеры сгорания;
- сложность конструкции и изготовления.

Широкое применение в смесительных головках маршевых ЖРД нашли двухкомпонентные центробежно-центробежные и струйно-центробежные форсунки. Основные схемы их приведены на рис. 10 и 11. Значительно реже используются форсунки, представляющие комбинации указанных форсунок со щелевыми (см. рис. 11, в).

По способу смешения компонентов различают два вида двухкомпонентных форсунок:

- с внутренним смешением;
- внешним смешением.

В форсунках с внутренним смешением (см. рис. 10) перемешивание компонентов топлива происходит в полости форсунки ещё до поступления их в камеру сгорания. Внутри форсунки образуется эмульсия, которая и поступает в камеру сгорания через наружный контур форсунки. Поэтому эти форсунки называют ещё эмульсионными.

Такие эмульсионные форсунки можно применять только для несамо воспламеняющихся топлив. При использовании самовоспламеняющихся топлив реакции горения начинаются уже при контакте компонентов в жидком виде, т.е. раньше, чем эмульсия выйдет из форсунки. Это может привести к прогару форсунки и даже огневого днища камеры, а значит, разрушению двигателя.

Двухкомпонентные форсунки с внешним смешением (см. рис. 11) осуществляют перемешивание компонентов топлива после их выхода из форсунки. Поэтому только они могут использоваться для подачи компонентов самовоспламеняющихся топлив.

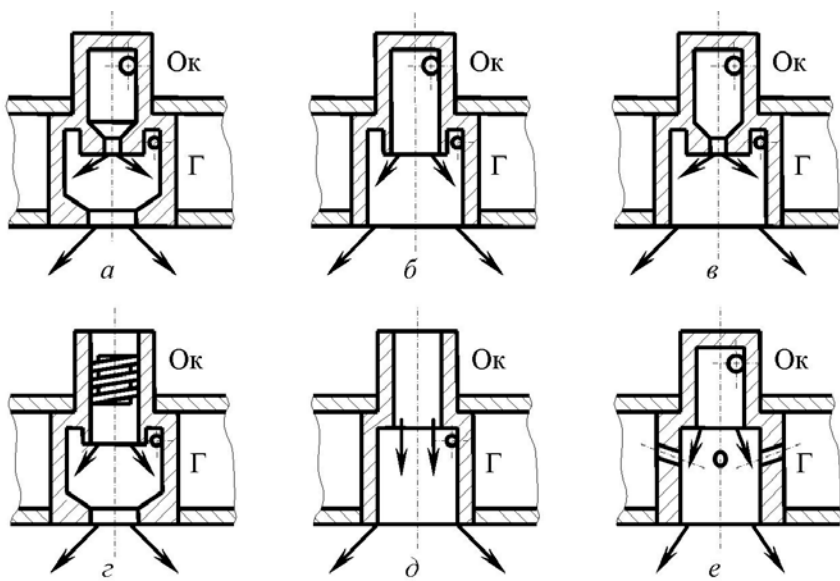


Рис. 10. Схемы двухкомпонентных форсунок с внутренним смешением:
a – центробежно-центробежная закрытая; *б* – центробежно-центробежная
открытая; *в* – центробежно-центробежная закрыто-открытая; *з* – центробежно-
центробежная открыто-закрытая; *д* – струйно-центробежная открытая;
е – центробежно-струйная открытая

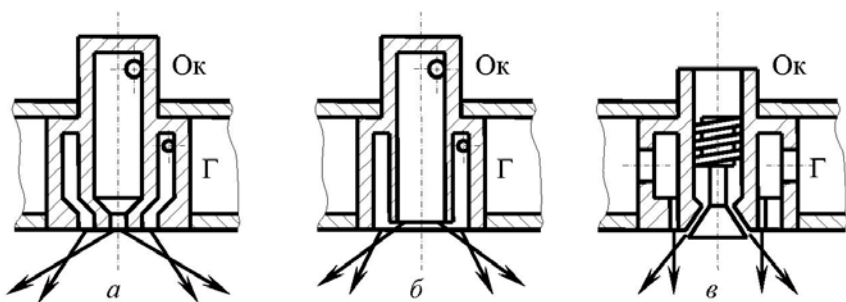


Рис. 11. Схемы двухкомпонентных форсунок с внешним смешением:
a – центробежно-центробежная закрытая; *б* – центробежно-центробежная
открытая; *в* – центробежно-щелевая

Двухкомпонентная форсунка является элементарным смесителем или смесительным элементом, т.к. обеспечивает смешение компонентов топлива в требуемом соотношении.

Двухкомпонентные форсунки представляют собой конструктивно блок двух однокомпонентных форсунок. Возможны самые различные конструктивные сочетания центробежной, струйной и щелевой форсунок. На рис. 11 в приведена схема двухкомпонентной форсунки с внешним смешением, в которой объединены однокомпонентные центробежная и щелевая форсунки.

Двухкомпонентные форсунки по сравнению с однокомпонентными имеют следующие преимущества:

- обеспечивают смешение компонентов ещё в жидком виде;
- позволяют в отдельных случаях улучшить смесеобразование;
- ускоряют протекание как подготовительных процессов, так и самого процесса горения топливной смеси;
- уменьшают необходимый для полного сгорания топлива объём камеры сгорания, а значит, и массу двигателя;
- повышают расходонапряжённость камеры сгорания, т.е. пропускную способность смесительной головки, по сравнению с однокомпонентными центробежными форсунками.

Недостатками двухкомпонентных форсунок являются:

- значительная конструктивная сложность и трудоёмкость изготовления;
- ужесточение тепловых условий работы смесительной головки за счёт приближения фронта пламени к огневому днищу смесительной головки и возрастанию интенсивности тепловых потоков к головке;
- снижение устойчивости камеры к высокочастотным колебаниям.

1.3.2. Выбирается тип форсунок для пристеночного слоя, если создание такового предусмотрено схемой организации рабочего процесса в камере двигателя.

Пристеночный слой создаётся для защиты стенок камеры ЖРД от перегрева, окисления, эрозии и прогара. Для снижения температуры продуктов сгорания в пристеночный слой подаётся в избытке

один из компонентов топлива, чаще – горючее. На периферии смесительной головки у огневой стенки камеры сгорания либо устанавливается специальный пристеночный пояс форсунок горючего (см. рис. 12 а), либо крайние пристеночные форсунки окислителя заменяются форсунками горючего, либо устанавливаются двухкомпонентные форсунки с меньшим расходом топлива и соотношением компонентов, определённым для пристеночного слоя.

При принятии проектного решения по выбору типа форсунок для пристеночного слоя следует пользоваться теми же изложенными выше рекомендациями по выбору типа форсунок для ядра потока или камеры в целом. Следует учитывать также выбранный тип форсунок для ядра потока.

1.4. Выбор схемы расположения форсунок на днище смесительной головки камеры

Размещение форсунок на огневом днище смесительной головки камеры должно способствовать:

- равномерному распределению по поперечному сечению камеры сгорания расходонапряжённости \dot{m}_F ;
- возможно более равномерному распределению по поперечному сечению камеры сгорания массового соотношения компонентов топлива K_m ;
- надёжной защите огневой стенки камеры сгорания и огневого днища смесительной головки от перегрева и прогара;
- удобству подвода в камеру компонентов топлива.

Рассмотрим основные схемы расположения форсунок.

В двигателях с однокомпонентными форсунками для обеспечения хорошего смесеобразования необходимо иметь равномерное чередование форсунок горючего и окислителя. Поэтому для них можно выделить следующие основные схемы расположения форсунок на смесительной головке камеры:

- шахматное;
- сотовое;
- концентрическое.

Все эти схемы расположения однокомпонентных форсунок показаны на рис. 12.

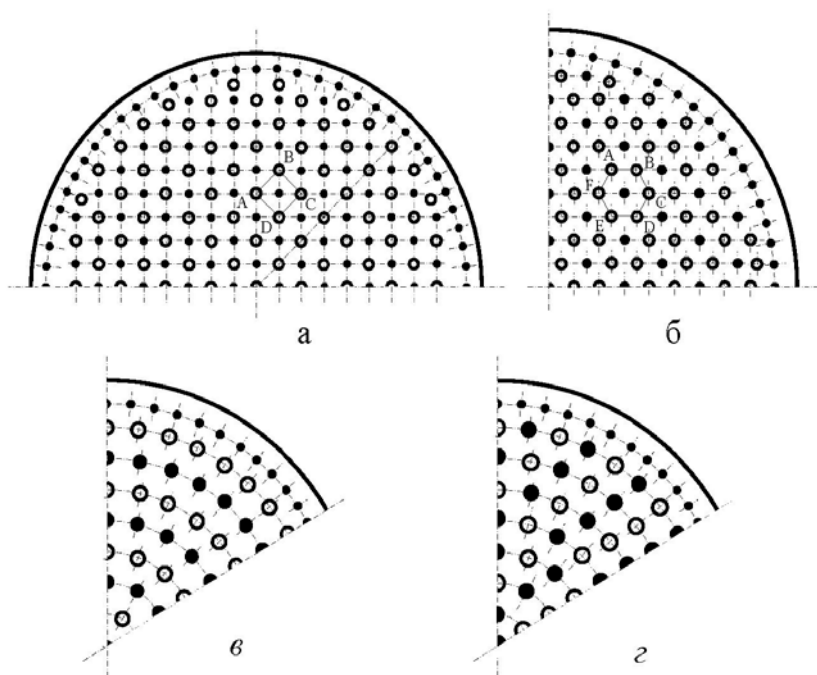


Рис. 12. Схемы расположения однокомпонентных форсунок на смесительной головке камеры ЖРД:

a – шахматное; *б* – сотовое; *в* – по концентрическим окружностям;

г – концентрически-шахматное;

○ – форсунки окислителя; ● – форсунки горючего; ◐ – пристеночные форсунки горючего меньшего расхода

При шахматном расположении однокомпонентных форсунок (см. рис. 12 *a*) количество форсунок горючего и окислителя на смесительной головке получается примерно равным. В элементарном смесителе ABCD на одну форсунку горючего приходится одна форсунка окислителя. Массовый расход окислителя через камеру обычно в 2...4 раза больше, чем горючего, и плотность окислителя больше. Значительно большее количество движения струи окислителя может ухудшить смесеобразование т.к. мощная струя окислителя

плохо смешивается с относительно слабой струёй горючего, сбивая её в сторону.

При соевом расположении однокомпонентных форсунок (см. рис. 12, б) в смесительном элементе ABCDEF на одну форсунку горючего приходится две форсунки окислителя. Происходит выравнивание количества движения струй горючего и окислителя, что приводит к лучшему распылению и смешению компонентов топлива.

При расположении однокомпонентных форсунок по концентрическим окружностям, когда чередуются пояса форсунок окислителя и горючего (см. рис. 12, в) или чередуются форсунки окислителя и горючего на одной концентрической окружности (см. рис. 12, г), упрощается в некоторых конструкциях смесительных головок подвод компонентов топлива к форсункам. Такие смесительные головки становятся более технологичными, т.е. упрощается их изготовление.

Двухкомпонентные форсунки могут быть размещены по любой схеме, однако чаще применяется концентрическое расположение.

Для предотвращения возникновения низкочастотной и высокочастотной неустойчивости в камере сгорания как однокомпонентные, так и двухкомпонентные форсунки иногда размещают в порядке, представляющем комбинацию указанных основных схем. С этой целью чередуют форсунки с различными расходами и углами распыла на одной и той же головке [2].

Для создания защитного пристеночного слоя с более низкой, чем в ядре потока, температурой продуктов сгорания устанавливают на смесительной головке специальный периферийный пояс форсунок горючего. Иногда крайние форсунки окислителя заменяются форсунками горючего. При использовании двухкомпонентных форсунок устанавливается периферийный пояс пристеночных двухкомпонентных форсунок с соотношением компонентов, установленным для пристеночного слоя. При этом пристеночные форсунки горючего обычно делают с большей дальностью и с меньшим расходом, чем ядерные. Шаг между периферийными форсунками и их местоположение подбираются так, чтобы обеспечить равномерную толщину пристеночного слоя по всему периметру камеры. Местное увеличение толщины пристеночного слоя приводит к увеличению потерь удельного импульса тяги, не улучшая защиту стенок. В то же время не следует допускать и чрезмерного утончения защитного пристеночного слоя или пробивания его струями окислителя.

При шахматном и сотовом расположении ядерных форсунок в смесительной головке приходится выполнять специальные переходные зоны между ядерными форсунками и пристеночными, располагаемыми обычно по концентричному поясу непосредственно около стенки.

1.5. Определение размеров форсунок и вычерчивание схемы их расположения

1.5.1. Выбираются размеры форсунок смесительной головки и шаг между ними.

1.5.1.1. Шаг между форсунками в ядре потока, если предусмотрена организация пристеночного слоя.

При предварительном выборе количества и габаритных размеров форсунок руководствуются следующими рекомендациями.

Наименьшее расстояние между осями центробежных форсунок на смесительной головке определяется наружным диаметром форсунки D_ϕ и необходимостью сохранения прочности днищ смесительной головки, ослабленных сверлениями под форсунки. Оно находится в пределах $H = 12...30$ мм [2].

На таких же расстояниях размещаются обычно и оси струйных форсунок.

Необходимо стремиться разместить на смесительной головке камеры максимальное возможное число форсунок, т.к. это обеспечивает более качественный распыл и смешение компонентов топлива. Поэтому в двигателях средней и большой тяги число форсунок достигает нескольких сотен [9].

В первом приближении можно считать, что шаг между центробежными форсунками H определяется эмпирическим уравнением

$$H = \sqrt{D_{zol}} \quad [\text{мм}], \quad (1)$$

где D_{zol} – диаметр плоской смесительной головки камеры сгорания в мм.

Для цилиндрической камеры сгорания $D_{zol} = D_k$, поэтому

$$H = \sqrt{D_k}. \quad (2)$$

Число форсунок на плоской смесительной головке камеры ЖРД ограничивается на практике рядом конструктивных, гидрогазодинамических и других соображений. Например, в центробежной форсунке диаметр тангенциального канала должен быть не менее 0,5 мм. При меньших диаметрах тангенциального канала проходные сечения форсунки могут легко засориться механическими примесями, попавшими случайно в распыляемый жидкий компонент, или твердыми частицами, образовавшимися в компоненте из-за его физической и химической нестабильности. Размеры тангенциальных, а также радиальных каналов форсунок обычно находятся в пределах 0,5...2,5 мм [4].

В существующих азотнокислотных ЖРД на 10 кН тяги камеры приходится около 20...30 форсунок топлива.

1.5.1.2. Внешний диаметр ядерных форсунок.

Для плоской смесительной головки камеры средней размерности [5] внешний диаметр однокомпонентной центробежной форсунки, двухкомпонентной центробежно-центробежной или струйно-центробежной форсунки при шаге между ними $H = 15...20$ мм определяется в первом приближении с помощью эмпирического уравнения

$$D_{\phi} = 0,75 \cdot H \quad [\text{мм}], \quad (3)$$

где H – шаг между ядерными форсунками первой итерации в мм.

Если диаметр форсунки получается менее 10 мм, то следует принять $D_{\phi} = 10$ мм.

Форсунки очень малых размеров не применяются в смесительных головках ЖРД из-за технологических трудностей их изготовления.

Окончательно принимаются и приводятся в пояснительной записке шаг между ядерными форсунками и внешний диаметр ядерных форсунок, которые получились в последней итерации.

Пример.

Окончательно принимаем шаг между ядерными форсунками $H = 17$ мм, а внешний диаметр ядерных форсунок $D_{\phi} = 14$ мм.

1.5.1.3. Внешний диаметр пристеночных форсунок горючего или двухкомпонентных форсунок.

Следует учитывать, что пристеночные форсунки обычно делаются с меньшим расходом, чем ядерные. Их внешний диаметр принимается немного меньше ядерных.

1.5.1.4. Шаг между пристеночными форсунками горючего или двухкомпонентными форсунками.

Шаг между периферийными форсунками делают поменьше, чтобы обеспечить равномерную толщину пристеночного слоя по всему периметру камеры.

1.5.2. Вычерчивается на компьютере с помощью лицензионного графического редактора принятая схема расположения форсунок на огневом днище смесительной головки с принятыми выше размерами.

При концентрическом расположении форсунок и условии одинакового шага между форсунками в окружном и радиальном направлениях ($H_\phi = H_r$) число форсунок n в каждом ряду и на смесительной головке в целом можно определить до вычерчивания схемы расположения форсунок, используя известные математические зависимости. Результаты расчета числа форсунок приведены в таблице.

Таблица

Число форсунок в ряду и на смесительной головке
при равенстве шагов по радиусу и окружности

Номер окружности	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Число форсунок в ряду	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60
Суммарное число форсунок	7	19	37	61	91	127	169	217	271	331

При этом подразумевается, что в центре огневого днища смесительной головки также размещена форсунка (см. рис. 12 *в* и *г*).

1.5.3. Определяется расстояние между форсунками в радиальном направлении

$$\Delta_\phi = H_r - D_\phi. \quad (4)$$

Следует отметить, что для обеспечения условий прочности днища смесительной головки и равномерности подвода компонента к форсункам необходимо иметь $\Delta_{\phi} \geq 3$ мм.

1.5.4. Определяется расстояние между пристеночными форсунками и огневой стенкой камеры сгорания Δ_{np} .

Необходимо иметь $\Delta_{np} \geq 3$ мм. Можно принять в некоторых случаях $\Delta_{np} = \Delta_{\phi}$.

1.6. Определение числа форсунок

По выполненной схеме расположения форсунок на огневом днище определяется количество форсунок компонентов топлива на смесительной головке камеры:

- 1) при организации смесительной головкой пристеночного слоя:
 - с однокомпонентными форсунками: $n_{окя}, n_{г.я}, n_{г.нр}$, а иногда и $n_{окнр}$;
 - с двухкомпонентными форсунками: $n_{я}, n_{нр}$;
- 2) при завесном охлаждении:
 - с однокомпонентными форсунками: $n_{ок}, n_{г}$;
 - с двухкомпонентными форсунками: n .

1.7. Массовые расходы компонентов топлива через одну форсунку

1.7.1. Массовые расходы окислителя, горючего или генераторного газа через одну форсунку:

- 1) при организации смесительной головкой пристеночного слоя:
 - с однокомпонентными форсунками:

1.7.1.1. Массовый расход окислителя через одну ядерную форсунку

$$\dot{m}_{\text{ф.ок.я}} = \frac{\dot{m}_{\text{ок.я}}}{n_{\text{ок.я}}}, \quad (5)$$

где $\dot{m}_{\text{ок.я}}$ – массовый расход окислителя через ядро потока камеры, $n_{\text{ок.я}}$ – число ядерных однокомпонентных форсунок окислителя.

1.7.1.2. Массовый расход горючего через одну ядерную форсунку

$$\dot{m}_{\text{ф.г.я}} = \frac{\dot{m}_{\text{г.я}}}{n_{\text{г.я}}}, \quad (6)$$

где $\dot{m}_{\text{г.я}}$ – массовый расход горючего через ядро потока камеры, $n_{\text{г.я}}$ – число ядерных однокомпонентных форсунок горючего.

1.7.1.3. Массовый расход горючего через одну пристеночную форсунку

$$\dot{m}_{\text{ф.г.пр}} = \frac{\dot{m}_{\text{г.пр}}}{n_{\text{г.пр}}}, \quad (7)$$

где $\dot{m}_{\text{г.пр}}$ – массовый расход горючего через пристеночный слой потока камеры, $n_{\text{г.я}}$ – число пристеночных однокомпонентных форсунок горючего.

1.7.1.4. Массовый расход окислителя через одну пристеночную форсунку или форсунку переходной зоны

$$\dot{m}_{\text{ф.ок.пр}} = \frac{\dot{m}_{\text{ок.пр}}}{n_{\text{ок.пр}}}, \quad (8)$$

где $\dot{m}_{\text{ок.пр}}$ – массовый расход окислителя через пристеночный слой потока камеры, $n_{\text{ок.пр}}$ – число пристеночных однокомпонентных форсунок окислителя.

➤ с двухкомпонентными форсунками:

1.7.1.1'. Массовый расход окислителя через одну ядерную двухкомпонентную форсунку

$$\dot{m}_{\text{ф.ок.я}} = \frac{\dot{m}_{\text{ок.я}}}{n_{\text{я}}}, \quad (9)$$

где $\dot{m}_{ок.я}$ – массовый расход окислителя через ядро потока камеры, $n_я$ – число ядерных двухкомпонентных форсунок.

1.7.1.2'. Массовый расход горючего через одну ядерную двухкомпонентную форсунку

$$\dot{m}_{ф.г.я} = \frac{\dot{m}_{г.я}}{n_я}, \quad (10)$$

где $\dot{m}_{г.я}$ – массовый расход горючего через ядро потока камеры, $n_я$ – число ядерных двухкомпонентных форсунок.

1.7.1.3'. Массовый расход горючего через одну пристеночную двухкомпонентную форсунку

$$\dot{m}_{ф.г.нр} = \frac{\dot{m}_{г.нр}}{n_{нр}}, \quad (11)$$

где $\dot{m}_{г.нр}$ – массовый расход горючего через пристеночный слой камеры, $n_{нр}$ – число пристеночных двухкомпонентных форсунок горючего.

1.7.1.4'. Массовый расход окислителя через одну пристеночную двухкомпонентную форсунку

$$\dot{m}_{ф.ок.нр} = \frac{\dot{m}_{ок.нр}}{n_{нр}}, \quad (12)$$

где $\dot{m}_{ок.нр}$ – массовый расход окислителя через пристеночный слой потока камеры, $n_{нр}$ – число пристеночных двухкомпонентных форсунок.

2) при завесном охлаждении:

➤ с однокомпонентными форсунками:

1.7.1.1". Массовый расход окислителя через одну форсунку

$$\dot{m}_{ф.ок} = \frac{\dot{m}_{ок}}{n_{ок}}, \quad (13)$$

где $\dot{m}_{ок}$ – массовый расход окислителя через смесительную головку камеры, $n_{ок}$ – число однокомпонентных форсунок окислителя.

1.7.1.2". Массовый расход горючего через одну форсунку

$$\dot{m}_{\phi\Gamma} = \frac{\dot{m}_{\Gamma}}{n_{\Gamma}}, \quad (14)$$

где \dot{m}_{Γ} – массовый расход горючего через смесительную головку камеры, n_{Γ} – число однокомпонентных форсунок горючего.

➤ с двухкомпонентными форсунками:

1.7.1.1". Массовый расход окислителя через одну двухкомпонентную форсунку

$$\dot{m}_{\phi.ок} = \frac{\dot{m}_{ок}}{n}, \quad (15)$$

где $\dot{m}_{ок}$ – массовый расход окислителя через смесительную головку камеры, n – число двухкомпонентных форсунок.

1.7.1.2". Массовый расход горючего через одну двухкомпонентную форсунку

$$\dot{m}_{\phi\Gamma} = \frac{\dot{m}_{\Gamma}}{n}, \quad (16)$$

где \dot{m}_{Γ} – массовый расход горючего через смесительную головку камеры, n – число ядерных двухкомпонентных форсунок.

Обычно расходы компонентов топлива через однокомпонентную форсунку находятся в пределах $\dot{m}_{\phi} = 30 \dots 300$ г/с. У пристеночных и периферийных форсунок расходы могут быть и меньше.

По данным [2], расходы компонентов через двухкомпонентную форсунку могут достигать значений 2,5...3 кг/с.

Приведённые минимальные значения расходов получаются как следствие применения существующих рекомендаций на минимально возможные проходные сечения форсунок и минимально возможные перепады давлений в форсунках $\Delta p_{\phi, \min} = 0,3$ МПа.

Обычный диапазон перепадов давлений на форсунках составляет [2]

$$\Delta p_{\phi} = 0,3 \dots 1,5 \text{ МПа}. \quad (17)$$

СОДЕРЖАНИЕ

1. Проектирование смесительной головки камеры.....	4
1.1. Выбор формы, типа и конструктивной схемы смесительной головки	4
1.2. Определение устройств, располагаемых на смесительной головке камеры.....	13
1.3. Выбор типа форсунок.....	13
1.4. Выбор схемы расположения форсунок на днище смесительной головки камеры.....	21
1.5. Определение размеров форсунок и вычерчивание схемы их расположения.....	24
1.6. Определение числа форсунок.....	27
1.7. Массовые расходы компонентов топлива через одну форсунку.....	27

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

и контрольные задания к курсовому проекту по дисциплине «Конструирование камер жидкостных ракетных двигателей» для студентов специальности 160700.65, 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» очной формы обучения.

Составители: Геннадий Иванович Скоморохов
Андрей Александрович Гуртовой

В авторской редакции

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный
технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14