

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА»

*В.С. ЕГОРЫЧЕВ*

## **РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ В ЖРД**

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия*

САМАРА  
Издательство СГАУ  
2010

УДК 629.7.036(075.8)  
ББК 39.65  
Е 307

Рецензенты: канд. техн. наук, Главный конструктор  
ПФ ОАО «НПО ЭНЕРГОМАШ им.  
академика В.П. Глушко» А.А. Г а н и н,  
канд. техн. наук, доц. В.А. Б о р и с о в

**Егорычев В.С.**  
Е 307 **Расчет и проектирование смесеобразования в ЖРД:** учеб.  
пособие.– Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2008.–  
с. : ил.

### **ISBN**

Изложена методика расчета и проектирования смесеобразования в камере ЖРД. Приведены основные сведения, позволяющие выбрать форму тип и конструктивную схему смесительной головки камеры, тип форсунок и элементарных смесителей, а также схему их расположения на смесительной головке.

Представлены общие сведения об устройстве и принципах работы форсунок ЖРД различных типов, приведены их математические модели и алгоритмы проектирования. Даны рекомендации по выбору основных режимных и конструктивных параметров различных форсунок.

Пособие снабжено необходимыми иллюстративными и справочными материалами.

Предназначено для студентов факультета двигателей летательных аппаратов, обучающихся по специальности 160302 – Ракетные двигатели, необходимо для выполнения курсового и дипломного проектирования.

УДК 629.7.036(075.8)  
ББК 39.65

**ISBN**

© Егорычев В.С., 2008  
© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2008

## О Г Л А В Л Е Н И Е

Основные сокращения, условные обозначения и индексы .....	5
В В Е Д Е Н И Е .....	8
1. ПРОЕКТИОВАНИЯ СМЕСИТЕЛЬНОЙ ГОЛОВКИ	
КАМЕРЫ .....	11
1.1. Выбор формы, типа и конструктивной схемы смесительной головки.....	11
1.2. Определение устройств, располагаемых на смесительной головке камеры .....	20
1.3. Выбор типа форсунок.....	20
1.4. Выбор схемы расположения форсунок на днище смесительной головки камеры .....	28
1.5. Определение размеров форсунок и вычерчивание схемы их расположения .....	31
1.6. Определение числа форсунок .....	34
1.7. Массовые расходы компонентов топлива через одну форсунку .....	34
2. ГИДРАГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТОПЛИВНЫХ ФОРСУНОК .....	38
2.1. Однокомпонентная струйная жидкостная форсунка ....	38
2.2. Однокомпонентная струйная газовая форсунка .....	44
2.3. Однокомпонентная центробежная жидкостная форсунка.....	47
2.4. Двухкомпонентная центробежно-центробежная жидкостная форсунка с внешним смешением.....	54
2.4.1. Проектный расчет наружного контура двухкомпонентной форсунки .....	54
2.4.2. Проектный расчет внутреннего контура двухкомпонентной форсунки .....	61
2.5. Двухкомпонентная центробежно-центробежная жидкостная форсунка с внутренним смешением.....	62
2.5.1. Начальное проектирование наружного контура двухкомпонентной эмульсионной форсунки.....	64

2.5.2. Проектный расчет внутреннего контура двухкомпонентной эмульсионной форсунки.....	65
2.5.3. Проектный расчет наружного контура двухкомпонентной эмульсионной форсунки.....	66
2.6. Двухкомпонентная струйно-центробежная газожидкостная форсунка с внешним смешением .....	71
2.6.1. Проектный расчет внутреннего контура двухкомпонентной газожидкостной форсунки .....	72
2.6.2. Проектный расчет наружного контура двухкомпонентной газожидкостной форсунки .....	75
2.7. Двухкомпонентная струйно-центробежная газожидкостная форсунка с внутренним смешением ...	81
2.8. Двухкомпонентная струйно-струйная газовая форсунка с внешним смешением .....	84
2.9. Двухкомпонентная струйно-струйная газовая форсунка с внутренним смешением.....	86
2.10. Двухкомпонентная струйно-струйная газожидкостная форсунка с внутренним смешением .....	88
3. ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ .....	91
СПРОЕКТИРОВАННЫХ ФОРСУНОК С ПОМОЩЬЮ .....	91
САПР «СМЕСЕОБРАЗОВАНИЕ В ЖРД».....	91
3.1. Инструкция пользователя .....	91
3.1.1. Инсталляция программы на жесткий диск.....	91
3.1.2. Удаление и восстановление программы.....	92
3.1.3. Ведение базы данных проектов.....	92
3.1.4. Поверочный проектный расчет и параметрические исследования спроектированной форсунки в САПР ...	93
Библиографический список .....	99

## 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;  
 $\varphi$  – коэффициент заполнения жидкостью сопла форсунки на выходе;  
 $\varphi_1$  – коэффициент удельного импульса;  
 $\varphi_k$  – коэффициент камеры сгорания;  
 $\varphi_c$  – коэффициент сопла;  
 $W$  – скорость рабочего тела;  
 $Z$  – степень укорочения сопла;  
 $\alpha$  – угол;  
 $\alpha_{ок}$  – коэффициент избытка окислителя;  
 $\beta$  – расходный комплекс, угол;  
 $\varepsilon$  – степень расширения рабочего тела в сопле;  
 $\lambda$  – приведенная скорость;  
 $\mu$  – коэффициент расхода, молярная масса;  
 $\pi_T$  – степень расширения газа в турбине;  
 $\rho$  – плотность;  
 $\sigma_f$  – коэффициент восстановления полного давления;  
 $\tau$  – время;  
 $\xi$  – коэффициент потерь удельного импульса тяги.

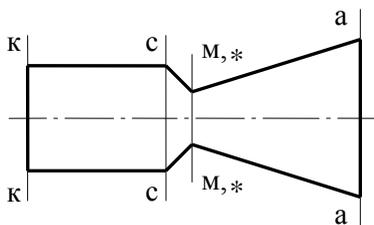
## И н д е к с ы

$a$  – 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 – расчетный;  
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;



## ВВЕДЕНИЕ

Проектирование ЖРД представляет собой сложный, трудоемкий, иерархически многоуровневый и итерационный процесс, осуществляемый с постоянными повторениями и возвратами к предыдущим стадиям и этапам. Он ведется специалистами опытного конструкторского бюро (ОКБ) на основе технического задания (ТЗ). Студентам же выдается вместо ТЗ задание на курсовую работу, содержащее минимально необходимые для проектирования ЖРД исходные данные.

После выполнения первой курсовой работы «Термодинамический расчет и проектирование камер ЖРД» по учебной дисциплине «Теория, расчет и проектирование ракетных двигателей», студенты получают размеры и профиль внутреннего контура камеры, действительные выходные и удельные параметры камеры и двигателя. Во второй курсовой работе им предстоит выполнить необходимые расчеты и спроектировать систему смесеобразования камеры ЖРД, обеспечивающую требуемую величину коэффициента камеры сгорания  $\varphi_k$ , принятую в первой курсовой работе.

Система смесеобразования осуществляет ввод, распыление, смешение и первоначальное распределение компонентов топлива или продуктов газогенерации в камере сгорания. Она должна обеспечивать высокую полноту сгорания топлива в камере сгорания, надёжную защиту стенок камеры от прогара и устойчивое протекание рабочего процесса [1].

При расчете и проектировании системы смесеобразования камеры ЖРД целесообразно придерживаться следующего общего порядка [9].

1. Обоснованно выбрать тип и форму форсуночной головки камеры и предварительно наметить ее конструктивную схему.

2. Выяснить какие устройства, кроме форсунок, нужно расположить на смесительной головке камеры, чтобы предусмотреть для них места установки.

3. Выбрать тип форсунок и схему расположения их на днище смесительной головки камеры.

4. Определить наружный диаметр форсунок и шаг между ними.

5. Вычертить на миллиметровой бумаге в масштабе 1:1 схему расположения форсунок на днище смесительной головки камеры, диаметром  $D_{зол}$ . Для цилиндрической камеры сгорания  $D_k = D_{зол}$ .

Можно вычертить половину, одну треть или одну шестую часть днища, если имеет место соответствующая симметрия расположения форсунок на нём.

6. Определить количество форсунок горючего  $n_r$ , окислителя  $n_{ок}$  или генераторного газа  $n_{гг}$ , или же двухкомпонентных форсунок в ядре потока и пристеночном слое, если организация такового предусмотрена.

7. Определить массовые расходы компонентов топлива через одну ядерную форсунку окислителя  $\dot{m}_{ф.ок.я}$ , горючего  $\dot{m}_{ф.г.я}$  или генераторного газа  $\dot{m}_{ф.гг.я}$ , одну пристеночную форсунку окислителя  $\dot{m}_{ф.ок.пр}$ , горючего  $\dot{m}_{ф.г.пр}$  или генераторного газа  $\dot{m}_{ф.гг.пр}$ , или расходы компонентов через одну двухкомпонентную ядерную и пристеночную форсунку, зная общий расход компонентов или генераторного газа через камеру.

Если тип головки не предусматривает установку ядерных и пристеночных форсунок, то определяются расходы компонентов топлива через форсунку окислителя, форсунку горючего или двухкомпонентную форсунку.

8. Провести проектный гидрогазодинамический расчет выбранного типа форсунок, обоснованно принимая ряд проектных решений. Проектируемая форсунка должна обеспечить требуемый массовый расход компонентов топлива  $\dot{m}_ф$  при выбранном Вами ранее в первой курсовой работе перепаде давления на форсунке  $\Delta p_ф$ .

Если он окажется меньше или больше выбранного и даже выходит за рекомендуемый обычно диапазон перепада давления на форсунке  $\Delta p_\phi$ , то необходимо соответственно изменить проходные сечения ядерных форсунок. В том случае, когда это окажется невозможным при условии невыхода за пределы рекомендованных норм, то необходимо изменить либо тип форсунок, либо схему их расположения на головке, либо наружный диаметр и количество форсунок, либо все вместе.

9. После корректировки схемы, расположения, типа и геометрических размеров ядерных и пристеночных форсунок следует провести их проектный гидрогазодинамический расчет. При этом особое внимание следует уделить сохранению выбранного оптимального соотношения компонентов топлива для каждого характерного смесительного элемента головки.

10. Используя принятые проектные решения и результаты проектных расчетов, вычертить в масштабе 10:1 поперечные и продольные разрезы ядерной и пристеночной двухкомпонентных форсунок или же ядерных и пристеночных однокомпонентных форсунок окислителя и горючего или генераторного газа, ориентируясь на существующие и выбранные схемы и прототипы.

Результаты эскизного проектирования камеры и её смесеобразования используются в качестве исходных данных при рабочем проектировании ЖРД в целом, его отдельных систем, агрегатов и узлов. Рабочее проектирование может потребовать корректировки результатов эскизного проектирования. Тогда вносятся необходимые изменения в значения отдельных параметров и расчет уточняется.

Нумерация разделов пояснительной записки курсовой работы «Расчет и проектирование смесеобразования в ЖРД», их название и содержание должны соответствовать настоящему учебному пособию.

Пособие предназначено студентам факультета двигателей летательных аппаратов, обучающимся по специальности 160302.65. Оно необходимо студентам при выполнении курсовых работ по учебной дисциплине «Теория, расчет и проектирование ракетных двигателей» и дипломных проектов.

# **1. ПРОЕКТИРОВАНИЯ 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 надежное 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, расчет 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 упрощенные рекомендации по принятию данного проектного решения.

Конкретный выбор формы и типа смесительной головки 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 расчетов 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 распространенными. Преимущество плоских головок заключается в простоте конструкции. При этом они обеспечивают достаточно хорошую однородность полей скоростей, соотношения компонентов и расходонапряженности по поперечному сечению камеры сгорания.

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

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

Окислитель из проточной части охлаждающего тракта камера 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.

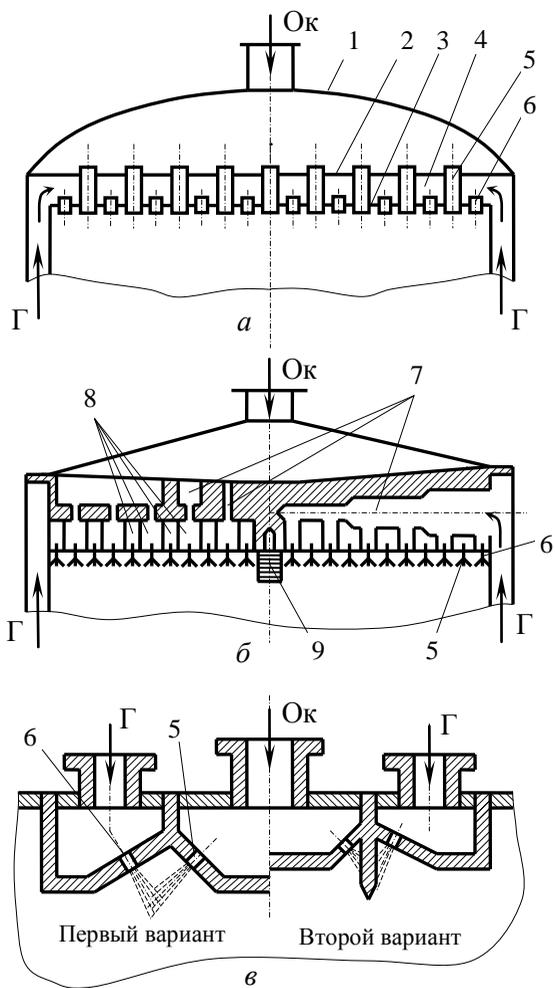


Рис. 1. Схемы жидкофазных плоских смешивательных головок:  
*a* – с двойным дном; *б* – со сверлениями; *в* – с пересекающимися струями окислителя и горючего;  
 1 – верхнее днище; 2 – среднее днище; 3 – огневое или нижнее днище; 4 – полость охладителя; 5 – форсунка окислителя; 6 – форсунка горючего;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

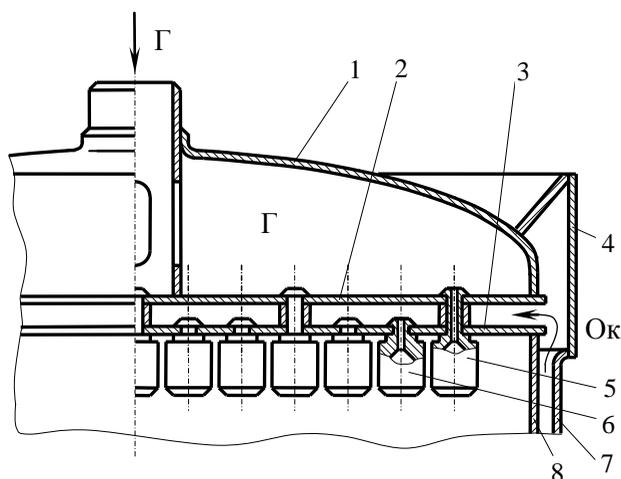


Рис. 2. Жидкофазная плоская смесительная головка с двойным дном и однокомпонентными форсунками:  
 1 – верхнее или наружное днище; 2 – среднее днище;  
 3 – огневое или нижнее днище; 4 – соединительное кольцо;  
 5 – форсунка горючего; 6 – форсунка окислителя; 7 – корпус камеры; 8 – огневая стенка камеры

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

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

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

Схема сферической жидкофазной смесительной 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.

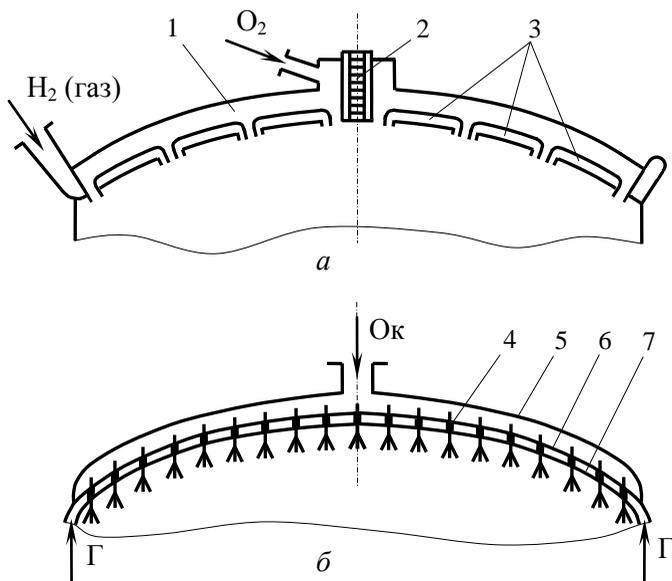


Рис. 3. Схемы сферических смешивательных головок:  
*a* – жидкогазофазной с двойным дном; *б* – жидкофазная с двухкомпонентными форсунками;  
 1 – полость жидкого кислорода; 2 – воспламенительное устройство;  
 3 – кольцевые полости газообразного водорода;  
 4 – двухкомпонентные жидкостные форсунки; 5 – верхнее днище;  
 6 – среднее днище; 7 – огневое или нижнее днище

Шатровые смешивательные 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 большую по сравнению с плоскими головками поверхность для размещения форсунок. Недостатком шатровых головок является сложность их изготовления и неравномерность расходунапряженности в поперечном сечении камеры. В этих головках

может происходить образование „жгута” распыленной топливной смеси.

Возможные конструктивные схемы жидкогазофазных смесительных головок приведены на рис. 5. На схеме *a* 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 поток газа через струйные форсунки 4, выполненные в виде

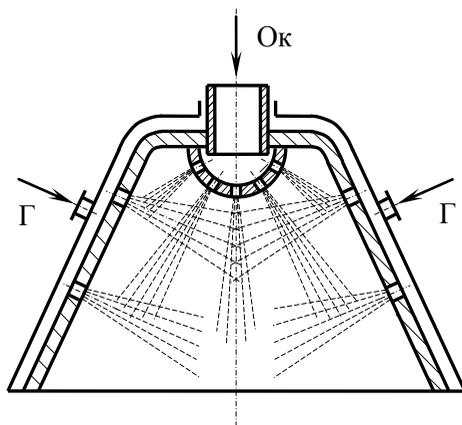


Рис. 4. Схемы шатровой жидкогазофазной смесительной головки с центральным подводом окислителя

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 ее поперечному сечению, после чего осуществляется впрыск жидкого компонента через отверстия смесителя той или иной формы. По сравнению со схемой, приведенной на рис.5, *a*, 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 ее части.

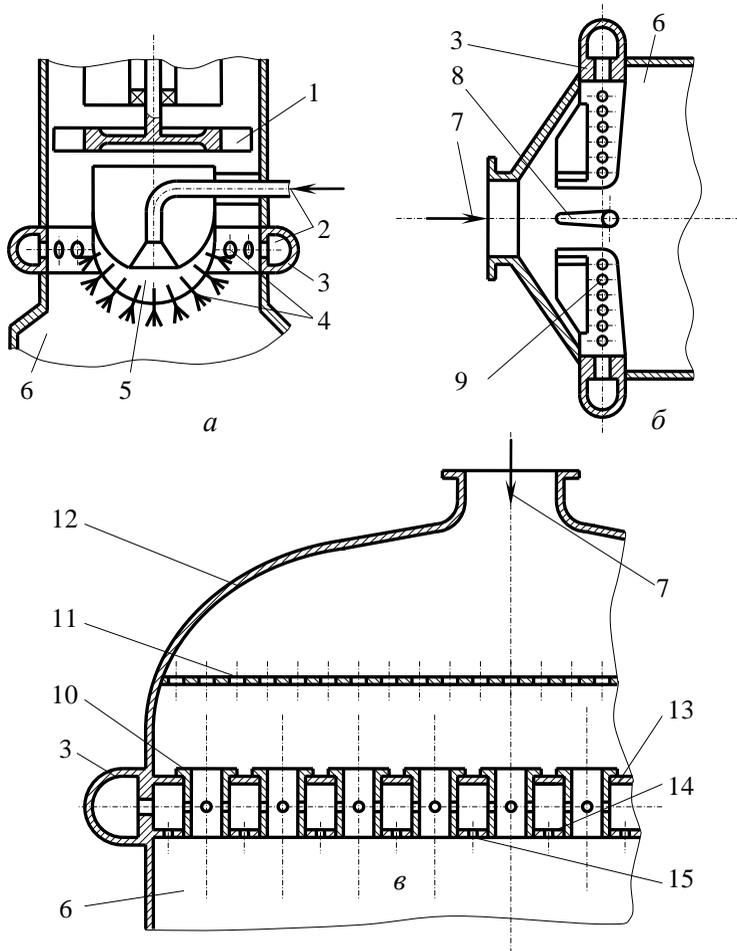


Рис. 5. Жидкогазофазные смесительные головки:

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

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

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

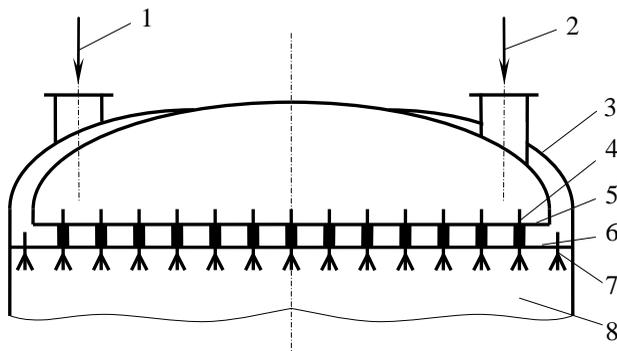


Рис. 6. Схема газовой смесительной головки:  
 1 – восстановительный генераторный газ из турбины первого ТНА; 2 – окислительный генераторный газ из турбины второго ТНА; 3 – верхнее днище; 4 – ядерная двухкомпонентная газовая форсунка; 5 – среднее днище; 6 – огневое или нижнее днище; 7 – пристеночная 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 ее 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 форсуночные головки могут снабжаться антипульсационными перегородками. В этих случаях в схеме расположения форсунок на головке необходимо учитывать наличие таких перегородок, например, путем установки дополнительных форсунок горючего, образующих топливную завесу на перегородках. Перегородки могут быть образованы и отдельными «гребенками» 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 камеру сгорания 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 смесительную головку 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 элементов 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,*
  - *щелевые.*
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 ДЛА, представляет собой различные комбинации двух основных типов: струйных и центробежных.

Работа любой форсунки жидкого топлива характеризуется качеством распыла, который определяется следующими параметрами:

1. Тонкостью распыла, оцениваемой некоторым средним размером капель, получающихся в факеле распыла.

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

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

4. Равномерностью расходонапряженности, 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.

Основным преимуществами струйных форсунок являются:

- простота их выполнения;
- большая пропускная способность смесительной головки со струйными форсунками, т. е. высокая расходонапряженность 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 форсунах смесительная головка со струйными форсунками обеспечивает большую расходонапряженность камеры.

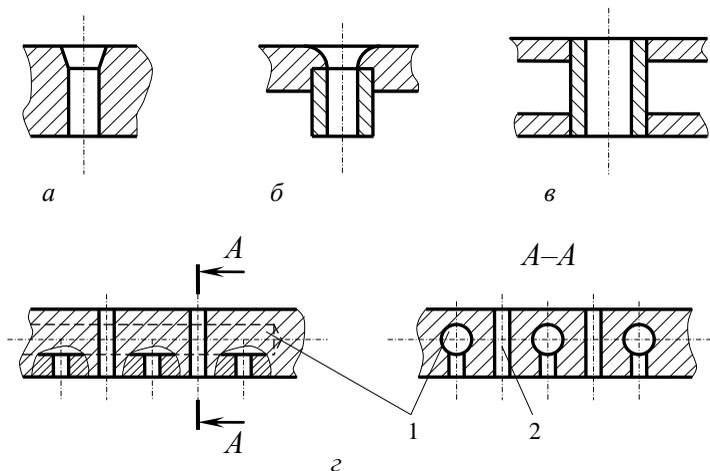


Рис. 7. Схемы различных видов струйных форсунок, применяемых в ЖРД:  
*a* – отверстие в огневом днище смесительной головки; *б* – цилиндрический насадок; *в* – трубка; *z* – с каналами в днище для подвода компонентов:  
 1 – сверления для подачи окислителя; 2 – круглый или кольцевой канал для подачи горючего

Значительными недостатками струйных форсунок являются:

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

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

Более тонкий и однородный распыл можно получить, если струйные форсунки расположить так, чтобы их струи пересекались или натекали на преграду. Однако расходонапряженность 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.

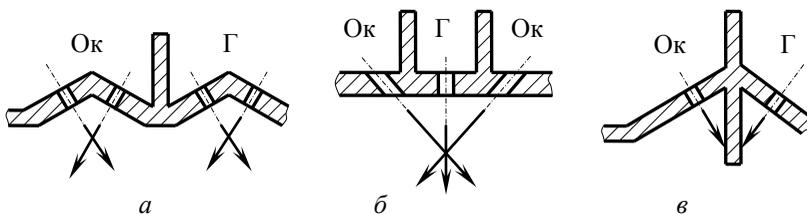


Рис. 8. Схемы струйных форсунок с пересекающимися и натекающими преграду струями:  
*a* – пересечение струй одного компонента; *б* – пересечение нескольких окислителя и горючего; *в* – натеканием струй окислителя и горючего на экран

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

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 счет тангенциального подвода рабочего тела в камеру закручивания, либо за счет 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 подразделяют:

- на *открытые*;
- *закрытые*.

Открытые форсунки имеют радиус сопла форсунки на выходе, равный радиусу камеры закручивания.

Схемы и конструктивное исполнение перечисленных типов центробежных форсунок приведены на рис. 9.

Основными преимуществами центробежных форсунок являются:

- более тонкий распыл компонентов;

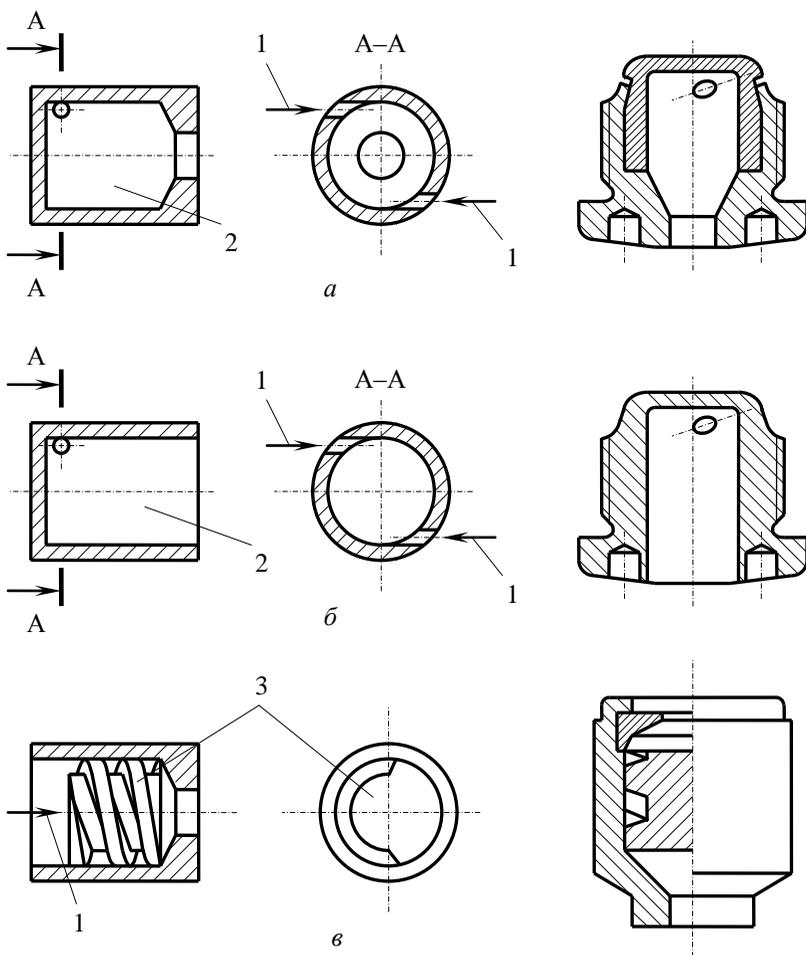


Рис. 9. Схемы и конструктивное исполнение центробежных форсунок:  
*а* – тангенциальная закрытая; *б* – тангенциальная открытая; *в* – шнековая закрытая;

1 – подача рабочего тела (жидкости или газа), 2 – камера закручивания; 3 – шнек

- большая однородность распыла;
- меньшая дальноточность струи;
- высокие углы распыла, составляющие 30...120°;

- более равномерная эпюра расходонапряженности 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 расходонапряженность камеры сгорания;
- сложность конструкции и изготовления;

Широкое применение в смесительных головках маршевых ЖРД нашли двухкомпонентные центробежно-центробежные и струйно-центробежные форсунки, основные схемы которых 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;
- с внешним смешением.

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

Такие эмульсионные форсунки можно применять только для несамовоспламеняющихся 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

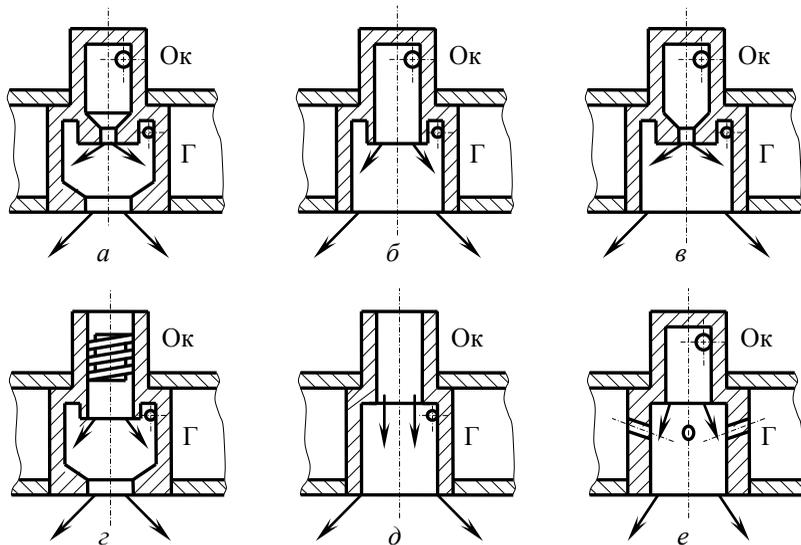


Рис. 10. Схемы двухкомпонентных форсунок с внутренним смешением:  
*a* – центробежно-центробежная закрытая; *б* – центробежно-центробежная открытая; *в* – центробежно-центробежная закрыто-открытая; *г* – центробежно-центробежная открыто-закрытая; *д* – струйно-центробежная открытая; *е* – центробежно-струйная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

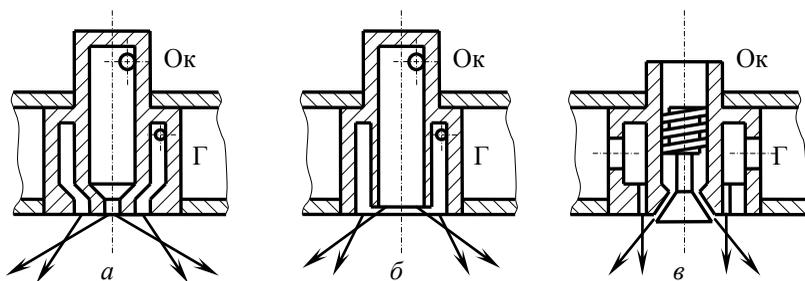


Рис. 11. Схемы двухкомпонентных форсунок с внешним смешением:  
*a* – центробежно-центробежная закрытая; *б* – центробежно-центробежная открытая; *в* – центробежно-щелевая

для подачи компонентов самовоспламеняющегося топлива.

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 самовоспламеняющегося топлива.

Двухкомпонентная форсунка является элементарным смесителем или смесительным элементом, т.к. обеспечивают 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 еще 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 расходонапряженность 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 такого предусмотрено схемой организации рабочего процесса в камере двигателя.

Пристеночный слой создается для защиты стенок камеры ЖРД от перегрева, окисления, эрозии и прогара. Для снижения температуры продуктов сгорания в пристеночный слой подается 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, *a*), либо крайние пристеночные форсунки окислителя заменяются форсунками горючего, либо устанавливаются двухкомпонентные форсунки с меньшим расходом топлива и соотношением компонентов, определенным 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 расходонапряженности  $\dot{m}_F$  ;
- возможно более равномерному распределению по поперечному сечению камеры сгорания массового соотношения компонентов топлива  $K_m$  ;
- надежной 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.

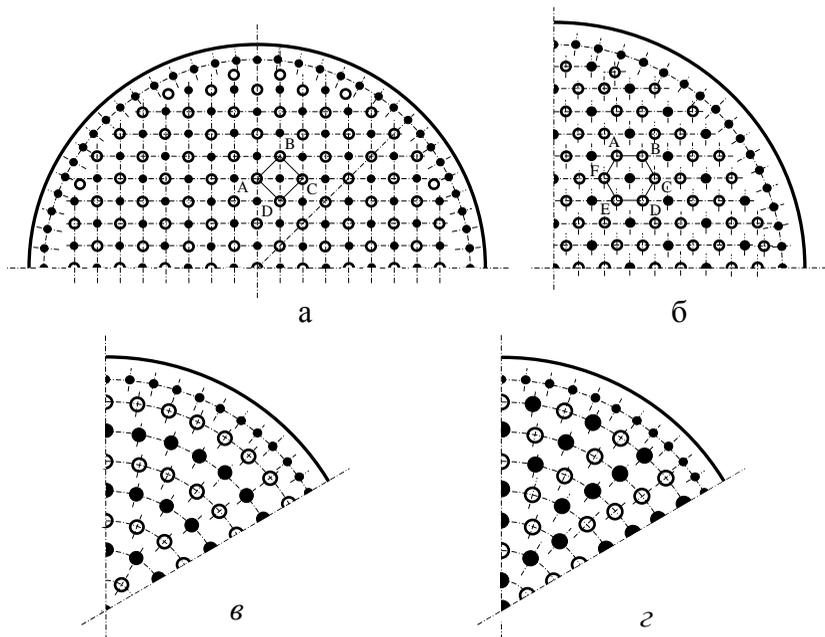


Рис. 12. Схемы расположения однокомпонентных форсунок на смесительной головке камеры ЖРД:

*а* – 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, *а*) 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 струей горючего, сбивая её в сторону.

При сотовом 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 делаются 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. Определяются размеры и шаг между форсунками смесительной головки.

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  $D_{\phi}$ , а также необходимостью сохранения прочности головки, ослабляемой сверлением под форсунки, и находится в пределах  $H = 12...30$  мм [2].

На таких же расстояниях размещаются обычно и струйные форсунки.

Необходимо стремиться разместить на смесительной головке камеры максимальное возможное число форсунок, т.к. это обеспечивает более качественный распыл 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

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

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

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

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

Число форсунок на плоской смесительной головке камеры ЖРД ограничивается на практике рядом конструктивных 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 направлении ( $H_\phi = H_r$ ) число форсунок  $n$  на смесительной головке можно определить из таблицы до вычерчивания схемы расположения форсунок, используя известные математические зависимости:

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 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 из 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  $\Delta_{np}$ .

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

$$\dot{m}_{\phi.окя} = \frac{\dot{m}_{окя}}{n_{окя}}, \quad (5)$$

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

1.7.1.2. Массовый расход горючего через одну ядерную форсунку

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

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

1.7.1.3. Массовый расход горючего через одну пристеночную форсунку

$$\dot{m}_{\phi.г.нр} = \frac{\dot{m}_{г.нр}}{n_{г.нр}}, \quad (7)$$

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

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

$$\dot{m}_{\phi.окнр} = \frac{\dot{m}_{окнр}}{n_{окнр}}, \quad (8)$$

где  $\dot{m}_{окнр}$  – массовый расход окислителя через простеночный слой потока камеры,  $n_{окнр}$  – число пристеночных однокомпонентных форсунок окислителя.

- с двухкомпонентными форсунками:

1.7.1.1'. Массовый расход окислителя через одну ядерную двухкомпонентную форсунку

$$\dot{m}_{\phi.окя} = \frac{\dot{m}_{окя}}{n_{я}}, \quad (9)$$

где  $\dot{m}_{окя}$  – 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

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

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

1.7.1.4'. Массовый расход окислителя через одну пристеночную двухкомпонентную форсунку

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

где  $\dot{m}_{ок.пр}$  – массовый расход окислителя через простеночный слой потока камеры,  $n_{пр}$  – 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  $\dot{m}_{\Gamma}$  – массовый расход горючего через смесительную головку камеры,  $n_{\Gamma}$  – 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  $\dot{m}_{\Gamma}$  – 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.

Приведенные 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]

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

## 2. ГИДРАГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТОПЛИВНЫХ ФОРСУНОК

В общем случае задача проектирования форсунок ЖРД заключается в выборе их размеров, обеспечивающих требуемые расходы компонентов топлива при заданном перепаде давления на форсунках. Число проектных параметров в зависимости от типа форсунки может изменяться от 3 (однокомпонентная струйная форсунка) до 16 (двухкомпонентная центробежно-центробежная форсунка). Причем, используя накопленный опыт их проектирования, можно указать допустимые пределы их изменения [2, 6, 14].

Очевидно, что заданному расходу и выбранному в первом приближении перепаду давления на форсунке соответствует большое множество проектных решений из области определения целевой функции. Задача проектировщика найти среди всех этих допустимых решений наиболее оптимальное, которое соответствует минимуму сформированной целевой функции. Именно в этом состоит задача оптимального проектирования форсунок ЖРД.

Ниже приводятся методики и алгоритмы проектирования различных типов форсунок, используемых в современных ЖРД.

### 2.1. Однокомпонентная струйная жидкостная форсунка

Проектный гидравлический расчет однокомпонентной струйной жидкостной форсунки, расчетная схема которой приведена на рис.13, проводится в следующей последовательности:

2.1.1. Выбирается в первом приближении диаметр проходного сечения или диаметр сопла форсунки на выходе  $d_c$ .

Этот диаметр может находиться в пределах  $0,2 \text{ мм} \leq d_c \leq D_\phi$  [13]. Минимальный диаметр сопла форсунки обусловлен легкостью засорения малых проходных сечений форсунки механическими примесями, попавшими случайно в распыляемый жидкий компонент, или твердыми частицами, образовавшимися в компоненте из-за его физической и химической нестабильности, а также трудностью изготовления тонких отверстий. Максимальный диаметр –

прочностью дна смесительной головки камеры и тонкостью распыла компонента.

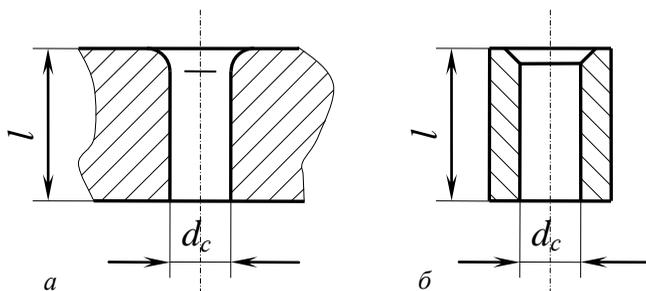


Рис. 13. Расчетная схема струйных форсунок:

*a* – отверстие в огневом днище смесительной головки; *б* – трубка

2.1.2. Определяется в первом приближении длина форсунки или длина сопла форсунки  $l$ .

Если форсунка подает компонент из полости смесительной головки, расположенной между средним и наружным днищами, то при определении её длины следует учитывать толщины этих днищ, расстояние между ними и величины выступов форсунки над средним и огневым днищами.

Толщина огневого и среднего днищ находится в интервале 2,0...3,0 мм, а расстояние между этими днищами составляет – 8...12 мм [7].

Если же форсунка подает компонент из полости смесительной головки, расположенной между средним и огневым днищами, то при определении её длины следует учитывать толщину лишь огневого днища и величины выступов форсунки над этим днищем.

2.1.3. Выбирается форма кромки канала со стороны входа компонента в форсунку.

Форма кромки канала струйной форсунки на входе может быть острой, закругленной по радиусу или с фаской (см. рис. 7 и 13). Форсунки с острой входной кромкой в смесительных головках ЖРД практически не используются.

2.1.4. Находится относительная длина форсунки или сопла форсунки, т. е. отношение  $\frac{l}{d_c}$ .

2.1.5. Определяется режим работы струйной жидкостной форсунки.

У струйных форсунок с острой входной кромкой при  $\frac{l}{d_c} > 1,5$

возможна реализация следующих режимов работы:

- безотрывный режим истечения, когда струя компонента заполняет всё выходное сечение форсунки;
- отрывный режим истечения, когда компонент истекает как из отверстия в тонкой стенке, не касаясь стенок сопла форсунки в выходном сечении. Смена режимов истечения происходит скачком при достижении на форсунке необходимого перепада давления  $\Delta p_{отр}$ ;
- кавитационный режим истечения. Он имеет место у относительно длинных форсунок и является переходным от безотрывного к отрывному режиму истечения. По мере увеличения скорости истечения происходит расширение кавитационной зоны и её распространение по длине форсунки к срезу. Длина зоны кавитации определяет степень развития кавитации в потоке. Условие существования кавитационного режима истечения жидкости из струйной форсунки имеет вид неравенства

$$ж \leq ж_{кр}, \quad (18)$$

где  $ж$  – число кавитации,  $ж_{кр}$  – критическое число кавитации, величина которого зависит от относительной длины канала форсунки и числа Рейнольдса.

У коротких струйных форсунок с острой входной кромкой, когда  $\frac{l}{d_c} < 1,5$ , возможна реализация следующих режимов работы:

- неустойчивый режим истечения в широком диапазоне чисел Рейнольдса ( $Re = 10^3 \dots 10^5$ ). Неустойчивость течения объ-

- ясняется различной степенью замыкания вихревой области на стенке, которая обусловлена рядом случайных причин;
- отрывной режим истечения.

Величина  $\Delta p_{отр}$  зависит от относительной длины форсунки. Очевидно, что  $\Delta p_{отр}$  возрастает с её повышением. Увеличить  $\Delta p_{отр}$

при  $p_k = \text{const}$  и  $\frac{l}{d_c} = \text{const}$  можно также скруглением входной кромки. Чем больше радиус скругления входной кромки и чем длиннее канал при постоянном диаметре сопла, тем больше  $\Delta p_{отр}$ . При большом радиусе скругления входной кромки отрыв потока не произойдёт даже при очень больших величинах перепада давления на форсунке, однако конструктивно такой канал удаётся выполнить далеко не всегда.

При использовании струйных форсунок в РД следует, прежде всего, учитывать их режим работы. Неустойчивый режим течения у форсунок, имеющих  $\frac{l}{d_c} < 1,5$ , является неблагоприятным для дви-

гателя из-за значительного колебания коэффициента расхода. Кавитационный режим истечения у форсунок с  $\frac{l}{d_c} < 1,5$  является тоже нежелательным, т.к. вызывает неустойчивость рабочего процесса двигателя. Поэтому и от кавитационных режимов следует отказаться. При использовании струйных форсунок в ДЛА, прежде всего, следует учитывать их режим работы. Неустойчивый режим течения у фор-

сунок с  $\frac{l}{d_c} > 1,5$  является неблагоприятным для двигателя из-за значительного колебания коэффициента расхода. Кавитационный режим истечения у форсунок с  $\frac{l}{d_c} > 1,5$  является тоже нежелатель-

ным, т.к. вызывает неустойчивость рабочего процесса двигателя. Поэтому и от кавитационного режима следует отказаться.

#### 2.1.6. Площадь сопла форсунки

$$F_\phi = \frac{\pi d_c^2}{4} \quad (19)$$

### 2.1.7. Число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{4\dot{m}_\phi}{\pi \eta d_c}, \quad (20)$$

где  $\eta$  – динамическая вязкость компонента топлива, подаваемого через форсунку;  $\dot{m}_\phi$  – массовый расход компонента топлива через форсунку.

2.1.8. Среднее значение скорости компонента на выходе из форсунки

$$W = \frac{\dot{m}_\phi}{\rho F_\phi}, \quad (21)$$

где  $\rho$  – плотность компонента при температуре на входе в форсунку.

2.1.9. Коэффициент расхода форсунки  $\mu$  :

➤ Для безотрывного режима истечения

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{K + \lambda \frac{l}{d_c}}}, \quad (22)$$

где  $K$  – потери на входе, связанные с перестройкой профиля скорости, сжатием и расширением потока;  $\lambda$  – коэффициент линейного гидравлического сопротивления форсунки.

2.1.9.1. Коэффициент линейного гидравлического сопротивления форсунки  $\lambda$  :

- при ламинарном течении компонента, когда  $\text{Re} < 2000$ , определяется эмпирической зависимостью Хагена-Пуазейля

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}; \quad (23)$$

- переходном и турбулентном – эмпирической зависимостью Блазиуса

$$\lambda = 0,3164 \cdot \text{Re}^{-0,25}; \quad (24)$$

- турбулентном течении компонента, когда  $\text{Re} > 10000$ ,  $\lambda = 0,031$ .

### 2.1.9.2. Потери на входе струйной форсунки $K$ :

- при ламинарном течении компонента, когда  $Re < 2000$ , определяются эмпирической зависимостью

$$K = 2,2 - 0,726 \cdot \exp\left(-74,5 \frac{\eta l}{\dot{m}_\phi}\right), \quad (25)$$

где  $\eta$  – динамическая вязкость компонента топлива, подаваемого через форсунку в Па·с;  $l$  – длина форсунки в м;  $\dot{m}_\phi$  – массовый расход компонента топлива через форсунку в кг/с.

- переходном и турбулентном течениях, когда  $Re > 2000$ ,

$$K = 1 + 2,65 \cdot \lambda. \quad (26)$$

➤ Для отрывного режима истечения компонента  $\mu = 0,62 \dots 0,65$ .

➤ Для кавитационного режима истечения компонента

$$\mu = \varepsilon \sqrt{1 + \lambda}, \quad (27)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент сжатия струи в самом узком её сечении.

Величина коэффициента сжатия струи  $\varepsilon$  в области автомодельности по числу Рейнольдса как в безотрывном, так и кавитационном режимах истечения сохраняется постоянной и может быть принята равной  $\varepsilon = 0,61 \dots 0,62$ .

2.1.10. Перепад давления на форсунке, обеспечивающий требуемый расход компонента топлива через форсунку,

$$\Delta p_\phi = \frac{\dot{m}_\phi^2}{2 \rho \mu^2 F_\phi^2}, \quad (28)$$

где  $\rho$  – плотность компонента топлива при температуре на входе в форсунку.

Полученный перепад давления на форсунке  $\Delta p_\phi$  не должен выходить за пределы рекомендованного диапазона (17) и должен быть равен или быть чуть меньше перепада, принятого ранее в разделе 3.3.1. первой курсовой работы «Термодинамический расчет и проектирование камер ЖРД». Если это не выполняется, то необходимо

изменить диаметр сопла форсунки  $d_c$ , принятый в первом приближении. Более точное значение для следующей итерации можно получить, используя уравнение (22). В крайнем случае можно изменить число форсунок  $n$ , схему их расположения на смесительной головке или изменить диаметр камеры сгорания на входе  $D_k$ .

**Внимание!** При проектировании пристеночных форсунок необходимо выполнить условия равенства перепадов давления на ядерных и пристеночных форсунках

$$\Delta p_{\text{ф.ок.я}} = \Delta p_{\text{ф.ок.пр}}, \quad \Delta p_{\text{ф.г.я}} = \Delta p_{\text{ф.г.пр}} \quad (29)$$

### 2.1.11. Критерий Вебера

$$We = \frac{\rho_k W^2 d_c}{\sigma}, \quad (30)$$

где  $\rho_k$  – плотность продуктов сгорания в сечении к – к на входе в камеру, куда происходит истечение компонента из форсунки;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения впрыскиваемого компонента топлива.

2.1.12. Медианный диаметр образовавшихся капель в факеле распыла форсунки

$$d_m = d_c \sqrt[3]{27\pi/4 \cdot We^{-0,333}}. \quad (31)$$

Тонкость распыла, характеризуемая медианным диаметром капель, образовавшихся в факеле распыла форсунки, может служить целевой функцией проектирования струйной форсунки, т.е. критерием качества её работы. По этой целевой функции часто ведется оптимизация струйной жидкостной форсунки.

## 2.2. Однокомпонентная струйная газовая форсунка

Расчетная схема однокомпонентной струйной газовой форсунки приведена на рис. 13. Проектный гидравлический расчет её проводится в следующей последовательности:

2.2.1. Выбирается в первом приближении диаметр проходного сечения или диаметр сопла форсунки на выходе  $d_c$ .

Этот диаметр может находиться в пределах  $0,5 \text{ мм} \leq d_c \leq D_\phi$  [4].

В первой итерации его можно принять равным 4...6 мм.

2.2.2. Определяется в первом приближении длина форсунки или длина сопла форсунки  $l$ .

Если форсунка подает компонент из полости смесительной головки, расположенной между средним и наружным днищами, то при определении её длины следует учитывать толщины этих днищ, расстояние между ними и величины выступов форсунки над средним и огневым днищами.

Толщина огневого и среднего днищ находится в интервале 2,0...3,0 мм, а расстояние между днищами составляет 8...12 мм [7].

Если же форсунка подает компонент из полости смесительной головки, расположенной между средним и огневым днищами, то при определении её длины следует учитывать толщину лишь огневого днища и величины выступов форсунки над этим днищем.

2.2.3. Выбирается форма кромки канала со стороны входа компонента в форсунку.

Форма кромки канала струйной форсунки на входе может быть острой, закругленной по радиусу или с фаской. Форсунки с острой входной кромкой в смесительных головках ЖРД используются очень редко.

2.2.4. Находится относительная длина форсунки или величина отношения  $\frac{l}{d_c}$ .

Отношение  $\frac{l}{d_c}$  должно быть  $\geq 1,5$  [2].

2.2.5. Площадь сопла форсунки на выходе

$$F_\phi = \frac{\pi d_c^2}{4} \quad (32)$$

2.2.6. Число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{4\dot{m}_\phi}{\pi \eta d_c}, \quad (33)$$

где  $\dot{m}_\phi$  – массовый расход генераторного газа через одну форсунку,  $\eta$  – динамическая вязкость генераторного газа, подаваемого через форсунку, при температуре за турбиной.

Значение динамической вязкости определяется по справочнику [8] для заданного топлива при максимальном значении коэффициента избытка окислителя, имеющемся в таблице, в случае окислительного газогенератора и минимальном значении – в случае восстановительного газогенератора.

2.2.7. Давление генераторного газа на входе в форсунку

$$p_{ex} = p_{\kappa} + \Delta p_{\phi}, \quad (34)$$

где  $p_{\kappa}$  – давление на входе в камеру сгорания.

2.2.8. Плотность генераторного газа на входе в форсунку

$$\rho_{ex} = \frac{p_{ex}}{R_{\Gamma} T_{ex}}, \quad (35)$$

где  $R_{\Gamma}$  – газовая постоянная генераторного газа,  $T_{ex}$  – температура генераторного газа на входе в форсунку.

2.2.9. Среднее значение скорости газа на выходе из форсунки

$$W = \frac{\dot{m}_{\phi}}{\rho_{ex} F_{\phi}}. \quad (36)$$

2.2.10. Коэффициент расхода форсунки  $\mu$ .

Коэффициент расхода определяется из уравнения, записанного в неявном виде,

$$\mu = \left( 1,23 + \frac{58l}{\text{Re} d_c} \mu \right)^{-1}, \quad (37)$$

которое сводится к квадратному уравнению относительно  $\mu$ . Решая это уравнение, получим

$$\mu = \frac{\sqrt{1,23^2 + 232 \cdot l / \text{Re} d_c}}{116 \cdot l / \text{Re} d_c}. \quad (38)$$

2.2.11. Площадь сопла форсунки на выходе

$$F_{\phi} = \frac{\dot{m}_{\phi, \Gamma \Gamma}}{\mu \rho_{ex} \left( \frac{p_{\kappa}}{p_{ex}} \right)^{\frac{1}{n}} \sqrt{2 \frac{n}{n-1} R_{\Gamma} T_{ex} \left[ 1 - \left( \frac{p_{\kappa}}{p_{ex}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]}}. \quad (39)$$

2.2.12. Диаметр сопла форсунки, обеспечивающей требуемый массовый расход генераторного газа при выбранном перепаде давления

$$d_c = \sqrt{\frac{4F_\phi}{\pi}}. \quad (40)$$

Если диаметр отличается от принятого значения или полученного в предыдущей итерации, то расчет форсунки повторяется при новом значении диаметра. Расчет прекращается, если значения диаметров в последней и предыдущей итерациях отличается не более, чем на 0,5 %.

### 2.3. Однокомпонентная центробежная жидкостная форсунка

Расчетная схема однокомпонентной центробежной жидкостной форсунки приведена на рис.14.

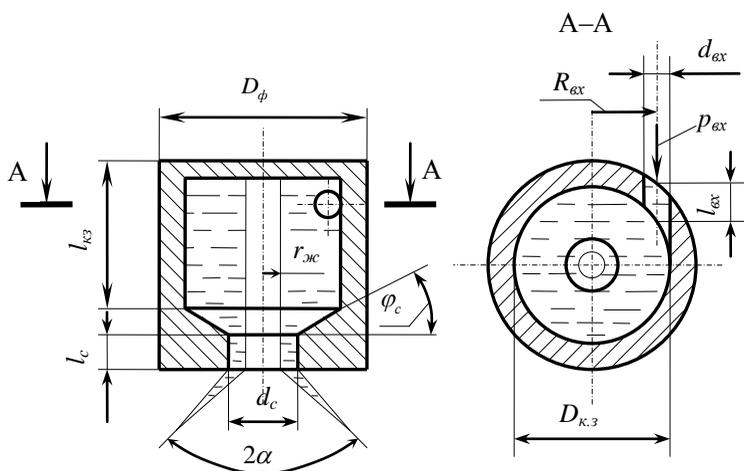


Рис.14. Расчетная схема и геометрические размеры однокомпонентной центробежной форсунки

Проектный расчет её проводится в следующей последовательности:

2.3.1. Находится диаметр камеры закручивания форсунки  $D_{к.з}$  по известному внешнему диаметру форсунки  $D_{\phi}$ , определенному в разделе 1.3.1.2,

$$D_{к.з} = D_{\phi} - 2\delta_{ст}, \quad (41)$$

где  $\delta_{ст}$  – толщина боковой стенки форсунки.

В первом приближении можно принять  $\delta_{ст} = 1,5$  мм.

2.3.2. Задаются числом входных тангенциальных отверстий  $i_{ex}$ .

Число входных тангенциальных отверстий выбирается в пределах  $i_{ex} = 2 \dots 6$  [1]. В общем случае  $i_{ex}$  может быть больше шести и доходить до 12, но тогда располагаться они должны на нескольких уровнях (ярусах).

1.8.3.3. Задаются диаметром входного тангенциального отверстия  $d_{ex}$ .

Рекомендуемый диапазон диаметров  $d_{ex} = 0,5 \dots 2,5$  мм. Число тангенциальных отверстий  $i_{ex}$  и их диаметр  $d_{ex}$  необходимо увязать между собой таким образом, чтобы в одном уровне не было перекрытия соседних тангенциальных отверстий и струи закручивались в камере закручивания форсунки, не распадаясь.

2.3.4. На чертеже поперечного разреза требуемого сечения форсунки, выполненного в масштабе 10:1, замеряют длину входного тангенциального отверстия  $l_{ex}$  (см. рис. 14) и определяют отношение  $l_{ex}/d_{ex}$ . Оно должно быть в интервале  $l_{ex}/d_{ex} = 1,5 \dots 6,0$ .

Если полученное значение  $l_{ex}/d_{ex}$  выходит за указанный интервал, то необходимо скорректировать соответствующим образом  $d_{ex}$ ,  $D_{к.з}$  или  $\delta_{ст}$ .

Длина входных отверстий в первом приближении может быть принята равной толщине стенки форсунки  $l_{ex} = 1,2 \delta_{ст}$ .

2.3.5. Длина камеры закручивания

$$l_{к.з} = \bar{l}_{к.з} \cdot D_{к.з}, \quad (42)$$

где  $\bar{l}_{к.з}$  – относительная длина камеры закручивания.

Относительная длина камеры закручивания должна находиться в пределах  $\bar{l}_{к.з} = 0,5 \dots 3,0$  [2; 7].

Если форсунка подает компонент из полости смесительной головки, расположенной между средним и наружным днищами, то при определении её длины следует учитывать толщины этих днищ, расстояние между ними и величины выступов форсунки над средним и огневым днищами.

Толщина огневого и среднего днищ находится в интервале 2,0...3,0 мм, а расстояние между днищами составляет – 8...12 мм [7].

Если же форсунка подает компонент из полости смесительной головки, расположенной между средним и огневым днищами, то при определении её длины следует учитывать толщину лишь огневого днища и величины выступов форсунки над этим днищем.

2.3.6. Выбирается угол наклона образующей конической поверхности перехода от камеры закручивания к соплу  $\varphi_c$

Существуют следующие рекомендации по выбору этого угла [2]  $\varphi_c = 30 \dots 85^\circ$ .

2.3.7. Величина радиуса, на котором расположена ось входного тангенциального отверстия от оси форсунки,

$$R_{\text{вх}} = R_{к.з} - r_{\text{вх}}. \quad (43)$$

2.3.8. Выбирается диаметр сопла форсунки  $d_c$ .

Для форсунки открытого типа  $d_c = D_{к.з}$ , а закрытого типа  $d_c < D_{к.з}$ . Чтобы улучшить качество распыла жидкости, рекомендуется выполнять форсунку закрытого типа, но иногда это неприемлемо по технологическим соображениям. В этом случае применяют форсунку открытого типа.

В первом приближении рекомендуется выбрать форсунку открытого типа.

При проектировании форсунки необходимо учитывать, что отношение должно быть  $R_{\text{вх}}/r_c = 1 \dots 25$ , а  $d_c/D_{к.з} = 0,2 \dots 1,0$  [2; 7].

2.3.9. Выбирается длина сопла форсунки  $l_c$

$$l_c = \bar{l}_c \cdot d_c, \quad (44)$$

где  $\bar{l}_c$  – относительная длина сопла форсунки.

Относительная длина сопла форсунки  $\bar{l}_c$  должна находиться в интервале от 0,2 до 1,0 [7].

2.3.10. Геометрическая характеристика центробежной форсунки

$$A = \frac{R_{ex} r_c}{i_{ex} r_{ex}^2}. \quad (45)$$

В общем случае, когда оси тангенциальных входных отверстий имеют с осью форсунки угол, отличный от прямого, имеем

$$A = \frac{R_{ex} r_c}{i_{ex} r_{ex}^2} \sin \theta, \quad (46)$$

где  $\theta$  – угол между осью входного тангенциального отверстия и направлением оси форсунки.

Для шнековой форсунки имеем

$$A = \frac{\pi R_{ex} r_c}{i_{ex} F_{ex}} \sin \theta, \quad (47)$$

где  $R_{ex}$  – средний радиус винтового канала шнека,  $i_{ex}$  – число заходов резьбы шнека,  $F_{ex}$  – площадь проходного сечения одного канала,  $\theta$  – угол подъема винтовой линии шнека.

2.3.11. Число Рейнольдса на входе в форсунку

$$\text{Re}_{ex} = \frac{4 \dot{m}_\phi}{\pi \eta d_{ex} \sqrt{i_{ex}}}, \quad (48)$$

где  $\eta$  – динамическая вязкость компонента топлива, подаваемого через форсунку,  $\dot{m}_\phi$  – массовый расход компонента через форсунку.

2.3.12. Коэффициент трения при условиях на входе в форсунку  $\lambda$  определяется с помощью эмпирической зависимости

$$\lg \lambda = \frac{25,8}{(\lg \text{Re}_{ex})^{2,58}} - 2. \quad (49)$$

2.3.13. Эквивалентная геометрическая характеристика форсунки, учитывающая влияние вязкости реальной жидкости

$$A_3 = \frac{A}{1 + \frac{\lambda}{2} R_{ex} (R_{ex} + d_{ex} - r_c)}, \quad (50)$$

где  $\lambda$  – коэффициент трения, определяемый при условиях на входе в форсунку.

2.3.14. Коэффициент живого сечения сопла форсунки

$$\varphi = 1 - \frac{r_{жс}^2}{r_c^2} = \frac{1}{\left( \sqrt[3]{\frac{A_3}{2\sqrt{2}} + \sqrt{\frac{A_3^2}{8} - \frac{1}{27}}} + \sqrt[3]{\frac{A_3}{2\sqrt{2}} - \sqrt{\frac{A_3^2}{8} - \frac{1}{27}}} \right)^2}. \quad (51)$$

2.3.15. Коэффициент расхода центробежной форсунки

$$\mu = \varphi \sqrt{\frac{\varphi}{2 - \varphi}}. \quad (52)$$

2.3.16. Средний угол факела распыла

$$\operatorname{tg} \bar{\alpha} = \frac{2\mu A_3}{\sqrt{(1 + \sqrt{1 - \varphi})^2 - 4\mu^2 A_3^2}}. \quad (53)$$

Для контроля правильности расчетов и принятия дальнейших проектных решений на рис. 15 представлены графики зависимостей коэффициентов живого сечения  $\varphi$ , расхода  $\mu$  и среднего угла факела распыла  $2\bar{\alpha}$  от действительной  $A$  или эквивалентной  $A_3$  геометрической характеристики центробежной форсунки.

2.3.17. Площадь сопла форсунки

$$F_\phi = \frac{\pi d_c^2}{4}. \quad (54)$$

2.3.18. Определяется потребный перепад давления на форсунке, обеспечивающий необходимый расход компонента через форсунку,

$$\Delta p_\phi = \frac{\dot{m}_\phi^2}{2\rho\mu^2 F_\phi^2}, \quad (55)$$

где  $\rho$  – плотность компонента топлива перед форсункой.

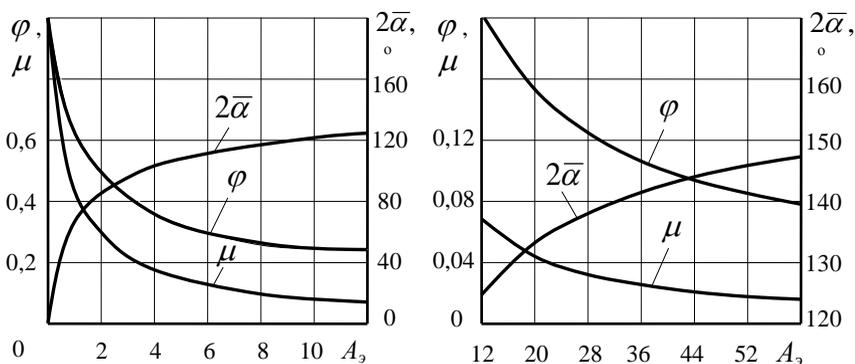


Рис. 15. Зависимость коэффициентов расхода  $\mu$ , живого сечения  $\varphi$  и среднего угла факела распыла  $2\bar{\alpha}$  от эквивалентной геометрической характеристики центробежной форсунки  $A_3$

Полученный перепад давления на форсунке  $\Delta p_\phi$  не должен выходить за пределы рекомендованного диапазона (17) и должен быть равен или быть чуть меньше перепада принятого ранее в разделе 3.3.1. первой курсовой работы «Термодинамический расчет и проектирование камер ЖРД». Если это не выполняется, то необходимо изменить  $d_c$ , принятый в первом приближении. Более точное значение  $d_c$  для следующей итерации можно получить, используя уравнение (45), записанное в явном виде относительно площади сопла форсунки  $F_\phi$ . Можно изменять геометрические размеры форсунок, назначенные в первом приближении. Прежде следует изменить в соответствующем направлении радиус входного тангенциального отверстия  $r_{ex}$  и их число  $i_{ex}$ . В крайнем случае, можно изменить число форсунок  $n$ , схему их расположения на смесительной головке, внешний диаметр форсунки  $D_\phi$  или даже диаметр камеры сгорания на входе  $D_\kappa$ . Может быть придется изменить и принятый ранее тип форсуночной головки.

**Внимание.** При проектировании пристеночных форсунок необходимо выполнить условие равенства перепадов давления на ядерных и пристеночных форсунках

$$\Delta p_{\text{ф.ок.я}} = \Delta p_{\text{ф.ок.пр}}, \quad \Delta p_{\text{ф.г.я}} = \Delta p_{\text{ф.г.пр}}. \quad (50)$$

2.3.19. Радиус вихря жидкости или воздушного вихря в выходном сечении форсунки

$$r_{\text{жс}} = r_c \sqrt{1 - \varphi}. \quad (51)$$

2.3.20. Площадь живого сечения сопла форсунки

$$F_{\text{жс}} = \varphi F_c. \quad (52)$$

2.3.21. Среднее значение осевой скорости на выходе из форсунки

$$W_a = \frac{\dot{m}_{\text{ф}}}{\rho F_{\text{жс}}}. \quad (53)$$

2.3.22. Среднее значение абсолютной скорости на выходе из форсунки

$$W = \frac{W_a}{\cos \bar{\alpha}}. \quad (54)$$

2.3.23. Толщина пелены на выходе из форсунки

$$\delta_n = r_c - r_{\text{жс}}. \quad (55)$$

2.3.24. Критерий Вебера

$$We = \frac{\rho_{\kappa} W^2 d_c}{\sigma}, \quad (56)$$

где  $\rho_{\kappa}$  – плотность продуктов сгорания в сечении к–к на входе в камеру, куда происходит истечение компонента из форсунки;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения впрыскиваемого компонента.

2.3.25. Критерий Лапласа

$$L_p = \frac{\rho_{\text{жс}} \delta_n \sigma}{\eta}, \quad (57)$$

где  $\eta$  – динамическая вязкость впрыскиваемого жидкого компонента топлива.

2.3.26. Медианный диаметр образовавшихся капель в факеле распыла форсунки

$$d_m = 269L_p^{-0,35} \left( \frac{We\rho_k}{\rho_{ex}} \right)^{-0,483} . \quad (58)$$

В качестве критериев оценки правильности спроектированной форсунки (целевой функции) могут использоваться также величина среднего угла факела распыла  $2\bar{\alpha}$ , тонкость распыла, оцениваемая медианным диаметром образовавшихся капель.

2.3.27. В итоге вычерчивается спроектированная центробежная форсунка по полученным геометрически размерам в масштабе 10:1.

В некоторых случаях проводят уточненный проектный расчет форсунки, учитывающий влияние на характеристики форсунки её конструктивных особенностей и геометрических параметров. Для этого необходимо иметь экспериментальные результаты исследования форсунок, аналогичной конструкции.

## **2.4. Двухкомпонентная центробежно-центробежная жидкостная форсунка с внешним смешением**

Расчетная схема двухкомпонентной центробежно-центробежной жидкостной форсунки с внешним смешением представлена на рис.16.

Форсунка состоит из наружного и внутреннего контуров. Оба контура работают и рассчитываются независимо друг от друга.

Проектный расчет такой двухкомпонентной форсунки проводится в следующей последовательности.

### **2.4.1. Проектный расчет наружного контура двухкомпонентной форсунки**

Наружный контур двухкомпонентной центробежно-центробежной жидкостной форсунки с внешним смешением представляет собой однокомпонентную центробежную жидкостную форсунку горячего (см. рис. 16). Последовательность проектного расчета такой форсунки следующая (см. раздел 1.6.3):

2.4.1.1. Находится диаметр камеры закручивания форсунки  $D_{к.з.н}$

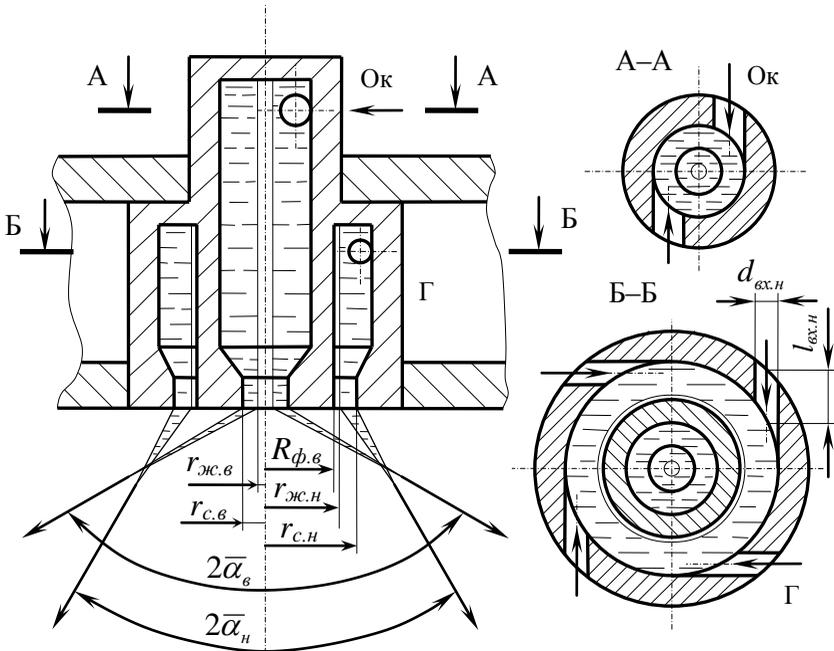


Рис. 16. Расчетная схема двухкомпонентной центробежно-центробежной жидкостной форсунки с внешним смешением

по известному внешнему диаметру форсунки  $D_\phi$ , определенному в разделе 1.3.1.2,

$$D_{к.з.н} = D_\phi - 2\delta_{ст.н}, \quad (54)$$

где  $\delta_{ст.н}$  – толщина стенки форсунки горючего.

В первом приближении можно принять  $\delta_{ст.н} = 1,5$  мм.

2.4.1.2. Задаются числом входных тангенциальных отверстий  $i_{вх.н}$ .

Количество входных тангенциальных отверстий должно находиться в пределах  $i_{вх.н} = 2 \dots 6$  [2]. В общем случае  $i_{вх.н}$  может быть

больше шести и доходить до 12, но тогда располагаться они должны на нескольких уровнях (ярусах).

2.4.1.3. Задаются диаметром входного тангенциального отверстия  $d_{вх.н}$ .

Рекомендуемый диапазон диаметров  $d_{вх.н} = 0,5 \dots 2,5$  мм. [2] Число тангенциальных отверстий  $i_{вх.н}$  и их диаметр  $d_{вх.н}$  необходимо увязать между собой таким образом, чтобы в одном уровне не было перекрытия соседних тангенциальных отверстий и струи закручивались в камере закручивания форсунки, не распадаясь, (см. рис. 16).

2.4.1.4. На поперечном разрезе нужного сечения чертежа форсунки, выполненного в масштабе 10:1, измеряют длину входного тангенциального отверстия  $l_{вх.н}$  (см. рис. 16) и определяют отношение  $l_{вх.н}/d_{вх.н}$ . Оно должно находиться в интервале  $l_{вх.н}/d_{вх.н} = 1,5 \dots 6,0$ .

Если полученное значение  $l_{вх.н}/d_{вх.н}$  выходит за указанный интервал, то необходимо скорректировать соответствующим образом  $D_{к.з.н}$ .

Длина входных отверстий в первом приближении может быть принята равной толщине стенки форсунки  $l_{вх.н} = \delta_{ст.н}$ .

2.4.1.5. Длина камеры закручивания

$$l_{к.з.н} = \bar{l}_{к.з.н} \cdot D_{к.з.н}, \quad (55)$$

где  $\bar{l}_{к.з.н}$  – относительная длина камеры закручивания.

Относительная длина камеры закручивания должна находиться в пределах  $\bar{l}_{к.з.н} = 0,5 \dots 3,0$  [2; 7].

Форсунка подает горючее из полости смесительной головки, расположенной между огневым и средним днищами. Поэтому при определении длины её камеры закручивания следует учитывать толщину огневого днища, расстояние между огневым и средним днищами и величину выступа форсунки над огневым днищем.

Толщина огневого и среднего днищ находится в интервале 2,0...3,0 мм. Расстояние между днищами составляет 8...12 мм [7].

2.4.1.6. Выбирается угол наклона образующей конической поверхности перехода от камеры закручивания к соплу  $\varphi_c$ .

Существуют следующие рекомендации по выбору этого угла  $\varphi_c = 30 \dots 85^\circ$  [2].

2.4.1.7. Величина радиуса, на котором расположена ось входного тангенциального отверстия от оси форсунки,

$$R_{\text{вх.н}} = R_{\text{к.з.н}} - r_{\text{вх.н}}. \quad (56)$$

2.4.1.8. Выбирается диаметр сопла форсунки  $d_{\text{с.н}}$ .

Для форсунки открытого типа  $d_{\text{с.н}} = D_{\text{к.з.н}}$ , а закрытого типа  $d_{\text{с.н}} < D_{\text{к.з.н}}$ . Чтобы улучшить качество распыла жидкости, рекомендуется выполнять форсунку закрытого типа, но иногда это бывает неприемлемым по технологическим соображениям. В этом случае применяют форсунку открытого типа.

В первом приближении рекомендуется выбрать форсунку открытого типа.

При проектировании форсунки необходимо учитывать, что отношение  $R_{\text{вх.н}}/r_{\text{с.н}}$  должно быть в пределах  $1 \dots 25$ , а отношение  $d_{\text{с.н}}/D_{\text{к.з.н}} = 0,2 \dots 1,0$ .

2.4.1.9. Выбирается длина сопла форсунки  $l_{\text{с.н}}$ .

$$l_{\text{с.н}} = \bar{l}_{\text{с.н}} \cdot d_{\text{с.н}}, \quad (57)$$

При выборе следует выполнить условие, что относительная длина сопла форсунки  $\bar{l}_{\text{с.н}}$  должна находиться в интервале  $\bar{l}_{\text{с.н}} = 0,2 \dots 1,0$ .

2.4.1.10. Геометрическая характеристика центробежной форсунки горючего

$$A = \frac{R_{\text{вх.н}} r_{\text{с.н}}}{i_{\text{вх.н}} r_{\text{вх.н}}^2}. \quad (58)$$

В общем случае, когда оси тангенциальных входных отверстий имеют с осью форсунки угол, отличный от прямого угла, имеем

$$A = \frac{R_{\text{вх.н}} r_{\text{с.н}}}{i_{\text{вх.н}} r_{\text{вх.н}}^2} \sin \theta, \quad (59)$$

где  $\theta$  – угол между осью входного тангенциального отверстия и направлением оси форсунки.

2.4.1.11. Число Рейнольдса на входе в форсунку

$$\text{Re}_{\text{ex}} = \frac{4\dot{m}_{\phi\Gamma}}{\pi \eta_{\Gamma} d_{\text{ex.н}} \sqrt{i_{\text{ex.н}}}}, \quad (60)$$

где  $\eta_{\Gamma}$  – динамическая вязкость горючего, подаваемого через форсунку.

2.4.1.12. Коэффициент трения при условии на входе в форсунку  $\lambda$  определяется с помощью эмпирической зависимости

$$\lg \lambda = \frac{25,8}{(\lg \text{Re}_{\text{ex}})^{2,58}} - 2. \quad (61)$$

2.4.1.13. Эквивалентная геометрическая характеристика форсунки, учитывающая влияние вязкости реальной жидкости, подаваемой через форсунку

$$A_3 = \frac{A}{1 + \frac{\lambda}{2} R_{\text{ex.н}} (R_{\text{ex.н}} + d_{\text{ex.н}} - r_{\text{с.н}})}, \quad (62)$$

где  $\lambda$  – коэффициент трения, определяемый при условии на входе в форсунку.

2.4.1.14. Коэффициент живого сечения сопла форсунки

$$\varphi = 1 - \frac{r_{\text{ж.н}}^2}{r_{\text{с.н}}^2} = \frac{1}{\left( \sqrt[3]{\frac{A_3}{2\sqrt{2}}} + \sqrt{\frac{A_3^2}{8} - \frac{1}{27}} + \sqrt[3]{\frac{A_3}{2\sqrt{2}}} - \sqrt{\frac{A_3^2}{8} - \frac{1}{27}} \right)^2}. \quad (63)$$

2.4.1.15. Коэффициент расхода центробежной форсунки горючего

$$\mu = \varphi \sqrt{\frac{\varphi}{2 - \varphi}}. \quad (64)$$

2.4.1.16. Средний угол факела распыла

$$\text{tg } \bar{\alpha} = \frac{2\mu A_3}{\sqrt{(1 + \sqrt{1 - \varphi})^2 - 4\mu^2 A_3^2}}. \quad (65)$$

Для контроля правильности расчетов и принятия дальнейших проектных решений на рис. 15 представлены графики зависимостей коэффициентов живого сечения  $\varphi$ , расхода  $\mu$  и среднего угла факела распыла  $2\bar{\alpha}$  от действительной геометрической характеристики центробежной форсунки  $A$  или эквивалентной –  $A_3$ .

2.4.1.17. Площадь сопла форсунки

$$F_{\phi.n} = \frac{\pi d_{c.n}^2}{4}. \quad (66)$$

2.4.1.18. Потребный перепад давления на форсунке горючего, обеспечивающий необходимый расход жидкого горючего через форсунку

$$\Delta p_{\phi.g} = \frac{\dot{m}_{\phi.g}^2}{2 \rho_g \mu^2 F_{\phi.n}^2}, \quad (67)$$

где  $\rho_g$  – плотность жидкого горючего перед форсункой.

Полученный перепад давления на форсунке  $\Delta p_{\phi.g}$  не должен выходить за пределы рекомендованного интервала (17) и должен быть равен или быть чуть меньше перепада, принятого ранее в разделе 3.3.1. первой курсовой работы «Термодинамический расчет и проектирование камер ЖРД». Если это не выполняется, то необходимо изменить  $d_{c.n}$ , принятый в первом приближении. Более точное значение  $d_{c.n}$  для следующей итерации можно получить, используя уравнение (45), записанное в явном виде относительно площади сопла форсунки  $F_{\phi.n}$ . Можно изменить геометрические размеры форсунок, назначенные в первом приближении. Прежде следует изменить в соответствующем направлении диаметр входного тангенциального отверстия  $d_{ex.n}$  и их число  $i_{ex.n}$ . В крайнем случае можно изменить число форсунок  $n$ , схему их расположения на смесительной головке, внешний диаметр форсунки  $D_\phi$  или даже диаметр камеры сгорания на входе  $D_\kappa$ . Может быть придется изменить и принятый ранее тип форсуночной головки.

**Внимание.** При проектировании пристеночной двухкомпонентной форсунки необходимо, чтобы перепады давления на ней в магистрали горючего и окислителя были точно такими как в ядерной.

$$\Delta p_{\text{ф.ок.я}} = \Delta p_{\text{ф.ок.нр}}, \quad \Delta p_{\text{ф.г.я}} = \Delta p_{\text{ф.г.нр}} \quad (68)$$

2.4.1.19. Радиус вихря жидкости или воздушного вихря в выходном сечении форсунки

$$r_{\text{ж.н}} = r_{\text{с.н}} \sqrt{1 - \varphi}. \quad (69)$$

2.4.1.20. Площадь живого сечения сопла форсунки

$$F_{\text{ж.н}} = \varphi F_{\text{с.н}}. \quad (70)$$

2.4.1.21. Среднее значение осевой скорости горючего на выходе из форсунки

$$W_a = \frac{\dot{m}_{\text{ф.г}}}{\rho_{\text{г}} F_{\text{ж.н}}}. \quad (71)$$

2.4.1.22. Среднее значение абсолютной скорости горючего на выходе из форсунки

$$W = \frac{W_a}{\cos \bar{\alpha}}. \quad (72)$$

2.4.1.23. Толщина пелены горючего на выходе из форсунки

$$\delta_n = r_{\text{с.н}} - r_{\text{ж.н}}. \quad (73)$$

2.4.1.24. Критерий Вебера

$$We = \frac{\rho_{\text{к}} W^2 d_{\text{с.н}}}{\sigma_{\text{г}}}, \quad (74)$$

где  $\rho_{\text{к}}$  – плотность продуктов сгорания в сечении к–к на входе в камеру, куда происходит истечение компонента из форсунки;  $\sigma_{\text{г}}$  – коэффициент поверхностного натяжения впрыскиваемого горючего.

2.4.1.25. Критерий Лапласа

$$L_p = \frac{\rho_{\text{г}} \delta_n \sigma_{\text{г}}}{\eta_{\text{г}}}, \quad (75)$$

где  $\eta_{\text{г}}$  – динамическая вязкость впрыскиваемого жидкого горючего.

2.4.1.26. Медианный диаметр образовавшихся капель в факеле распыла форсунки

$$d_{.m} = 259L_p^{-0,35} \left( \frac{We \rho_{\kappa}}{\rho_{\text{ex}}} \right)^{-0,483} . \quad (76)$$

В качестве дополнительных критериев оценки правильности спроектированной форсунки (целевой функции) могут использоваться величина среднего угла факела распыла  $2\bar{\alpha}$ , тонкость распыла, оцениваемая медианным диаметром образовавшихся капель.

#### 2.4.2. Проектный расчет внутреннего контура двухкомпонентной форсунки

Внутренний контур двухкомпонентной центробежно-центробежной жидкостной форсунки с внешним смещением представляет собой однокомпонентную центробежную жидкостную форсунку окислителя, последовательность проектного расчета которой приведена в разделе 1.6.3.

При проектировании внутреннего контура двухкомпонентной центробежно-центробежной жидкостной форсунки с внешним смещением необходимо выполнить следующие дополнительные требования:

1. Корпус внутреннего контура не должен мешать струям компонента, подаваемым через тангенциальные отверстия наружного контура, свободно закрутиться и растечься по поверхности камеры закручивания. Для этого должно быть выполнено соотношение

$$D_{\phi, \text{в}} \leq D_{\text{к.з.н}} - 2d_{\text{вх.н}} , \quad (77)$$

где  $D_{\phi, \text{в}}$  – наружный диаметр внутреннего контура форсунки,  $D_{\text{к.з.н}}$  и  $d_{\text{вх.н}}$  – диаметры камеры закручивания и входного тангенциального отверстия наружного контура форсунки соответственно (см. рис. 16).

2. Корпус внутреннего контура двухкомпонентной центробежно-центробежной жидкостной форсунки должен полностью располагаться внутри воздушного вихря наружного контура этой форсунки. Для этого нужно иметь

$$D_{ф.в} = d_{ж.н} - 2\Delta_{в.н}, \quad (78)$$

где  $d_{ж.н} = 2r_{ж.н}$  – диаметр вихря жидкости или воздушного вихря,  $\Delta_{в.н}$  – радиальный зазор между корпусом внутреннего контура и воздушным вихрем наружного контура форсунки.

Желательно, чтобы этот радиальный зазор между корпусом внутреннего контура и воздушным вихрем наружного контура форсунки  $\Delta_{в.н}$  был небольшим, т. к. в противном случае возможен прогар корпуса внутреннего контура форсунки. В учебнике [7] рекомендуется выбирать  $\Delta_{в.н} = 0,05 \dots 0,5$  мм.

3. Аналогично следует обеспечить зазор в выходном сечении двухкомпонентной центробежно-центробежной жидкостной форсунки между наружным диаметром сопла внутреннего контура  $D_{с.в} = d_{с.в} + \Delta_{ст.с.в}$  и диаметром воздушного вихря наружного контура форсунки  $d_{ж.н}$ . Это формализовано записывается

$$D_{с.в} = d_{ж.н} - 2\Delta_{в.н}. \quad (79)$$

4. Угол распыла внутреннего контура  $2\alpha_v$  должен быть больше угла распыла наружного контура  $2\alpha_n$  двухкомпонентной форсунки. Это обеспечивает пересечение факелов распыла компонентов топлива недалеко от среза сопла форсунки, ускоряет смесеобразование и повышает качество подготовительных рабочих процессов.

## 2.5. Двухкомпонентная центробежно-центробежная жидкостная форсунка с внутренним смешением

Расчетная схема двухкомпонентной центробежно-центробежной жидкостной форсунки с внутренним смешением или эмульсионной форсунки приведена на рис.17.

Форсунка состоит из наружного и внутреннего контуров. Внутренний контур работает и рассчитывается независимо от наружного,

а наружный контур рассчитывается с учетом работы внутреннего контура.

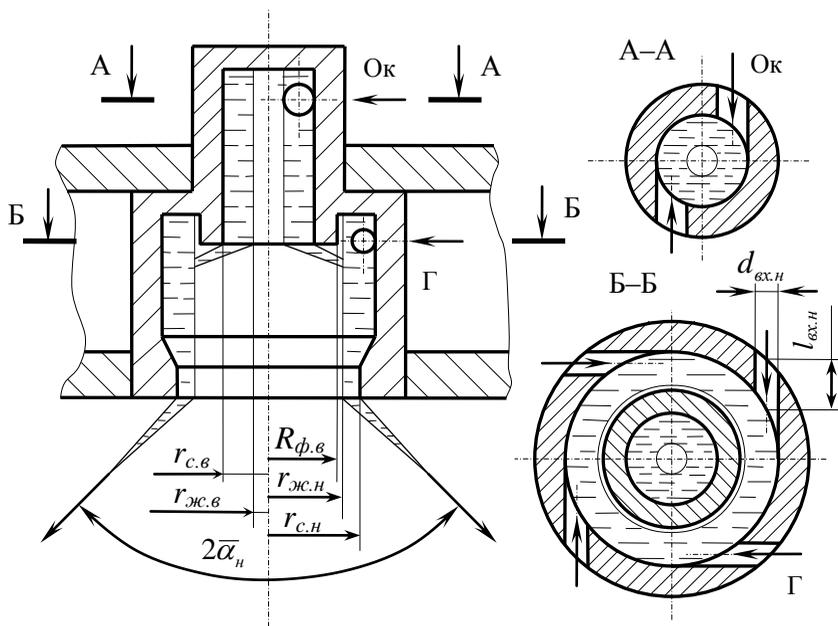


Рис. 17. Расчетная схема двухкомпонентной центробежно-центробежной жидкостной форсунки с внутренним смешением

Наружный контур двухкомпонентной центробежно-центробежной жидкостной форсунки с внутренним смешением представляет собой однокомпонентную центробежную жидкостную форсунку горючего, в камеру закручивания которой со стороны газового вихря подается ещё и второй компонент окислитель из внутреннего контура двухкомпонентной центробежно-центробежной жидкостной форсунки. Эти компоненты смешиваются уже внутри камеры закручивания наружного контура, образуя эмульсию. Эта эмульсия и вытекает из форсунки в виде пелены, распадаясь на капли.

Проектный расчет такой двухкомпонентной эмульсионной форсунки проводится в следующей последовательности.

### 2.5.1. Начальное проектирование наружного контура двухкомпонентной эмульсионной форсунки

Начальное проектирование наружного контура двухкомпонентной центробежно-центробежной жидкостной форсунки с внутренним смещением необходимо для проектного расчета внутреннего контура, представляющего собой однокомпонентную центробежную жидкостную форсунку окислителя.

Последовательность начального проектного расчета наружного контура эмульсионной форсунки следующая:

2.5.1.1. Определяется диаметр камеры закручивания форсунки горючего, являющейся наружным контуром двухкомпонентной эмульсионной форсунки  $D_{к.з.н}$  по известному внешнему диаметру форсунки  $D_{ф}$ , вычисленному в разделе 1.3.1.2,

$$D_{к.з.н} = D_{ф} - 2\delta_{ст.н}, \quad (80)$$

где  $\delta_{ст.н}$  – толщина стенки форсунки горючего.

В первом приближении можно принять  $\delta_{ст.н} = 1,5$  мм.

Для лучшего понимания данного этапа проектирования смотри также расчетную схему и геометрические параметры однокомпонентной жидкостной центробежной форсунки (рис. 14).

2.5.1.2. Задаются числом входных тангенциальных отверстий, подающих в камеру закручивания горючее  $i_{вх.н}$ .

Количество входных тангенциальных отверстий должно находиться в пределах  $i_{вх.н} = 2 \dots 6$  [2]. В общем случае может быть больше шести и доходить до 12, но располагаться тогда они должны на нескольких уровнях (ярусах).

2.5.1.3. Задаются диаметром входного тангенциального отверстия  $d_{вх.н}$ .

Рекомендуемый диапазон диаметров  $d_{вх.н} = 0,5 \dots 2,5$  мм [1].

Число тангенциальных отверстий  $i_{вх.н}$  и их диаметр  $d_{вх.н}$  необходимо увязать между собой таким образом, чтобы на одном уровне не было перекрытия соседних тангенциальных отверстий, а струи

горючего закручивались в камере закручивания форсунки, не распадаясь.

2.5.1.4. На поперечном разрезе нужного сечения чертежа форсунки, выполненного в масштабе 10:1, замеряется длина входного тангенциального отверстия  $l_{\text{вх.н}}$  (см. рис. 17) и определяют отношение  $l_{\text{вх.н}}/d_{\text{вх.н}}$ . Оно должно быть в интервале  $l_{\text{вх.н}}/d_{\text{вх.н}}=1,5\dots6,0$ .

Если полученное значение  $l_{\text{вх.г}}/d_{\text{вх.г}}$  выходит за указанный интервал, то необходимо скорректировать соответствующим образом  $D_{\text{к.з.н}}$ .

Длина входных отверстий в первом приближении может быть принята равной толщине стенки форсунки горючего  $l_{\text{вх}} = \delta_{\text{ст}}$ .

2.5.1.5. Длина камеры закручивания наружного контура

$$l_{\text{к.з.н}} = \bar{l}_{\text{к.з.н}} \cdot D_{\text{к.з.н}}, \quad (81)$$

где  $\bar{l}_{\text{к.з.н}}$  – относительная длина камеры закручивания.

Относительная длина камеры закручивания должна находиться в пределах  $\bar{l}_{\text{к.з.н}}=0,5\dots3,0$  [2; 7].

При определении длины камеры закручивания форсунки горючего, которая подает компонент из полости смесительной головки, расположенной между огневым и средним днищами, следует учитывать толщину огневого днища, расстояние между этими днищами и величину выступа эмульсионной форсунки над огневым днищем.

Толщина огневого и среднего днищ находится в интервале 2,0...3,0 мм, а расстояние между днищами составляет 8...12 мм [7].

## 2.5.2. Проектный расчет внутреннего контура двухкомпонентной эмульсионной форсунки

Внутренний контур двухкомпонентной центробежно-центробежной жидкостной форсунки с внутренним смешением представляет собой однокомпонентную центробежную жидкостную форсунку окислителя, последовательность проектного расчета которой приведена в разделе 1.8.3.

При проектировании внутреннего контура двухкомпонентной центробежно-центробежной жидкостной форсунки с внутренним смешением необходимо выполнить следующие дополнительные требования:

1. Корпус внутреннего контура форсунки не должен мешать струям горючего, подаваемым через тангенциальные отверстия наружного контура, свободно закрутиться и растечься по поверхности камеры закручивания. Для этого должно быть выполнено соотношение

$$D_{ф.в} \leq D_{к.з.н} - 2d_{вх.н}, \quad (82)$$

где  $D_{ф.в}$  – наружный диаметр внутреннего контура форсунки,  $D_{к.з.н}$  и  $d_{вх.н}$  – диаметры камеры закручивания и входного тангенциального отверстия наружного контура форсунки соответственно (см. рис. 16).

2. Корпус внутреннего контура двухкомпонентной центробежно-центробежной жидкостной форсунки должен полностью располагаться внутри воздушного вихря наружного контура этой форсунки. Для этого нужно иметь

$$D_{ф.в} = d_{ж.н} - 2\Delta_{в.н}, \quad (83)$$

где  $d_{ж.н} = 2r_{ж.н}$  – диаметр вихря жидкости или воздушного вихря,  $\Delta_{в.н}$  – радиальный зазор между корпусом внутреннего контура и воздушным вихрем наружного контура форсунки.

Желательно, чтобы этот радиальный зазор был небольшим, т. к. в противном случае возможен прогар корпуса внутреннего контура форсунки. В учебнике [7] рекомендуется выбирать  $\Delta_{в.н} = 0,05 \dots 0,5$  мм.

### 2.5.3. Проектный расчет наружного контура двухкомпонентной эмульсионной форсунки

2.5.3.1. Выбирается угол наклона образующей конической поверхности перехода от камеры закручивания к соплу  $\varphi_{с.н}$ .

Существуют следующие рекомендации в учебнике [2] по выбору этого угла  $\varphi_{с.н} = 30...85^\circ$ .

2.5.3.2. Радиус от оси форсунки, на котором расположена ось входного тангенциального отверстия,

$$R_{вх.н} = R_{к.з.н} - r_{вх.н}. \quad (84)$$

2.5.3.3. Массовый расход топлива через эмульсионную форсунку или эмульсии через наружный контур

$$\dot{m}_\phi = \dot{m}_{\phi.ок} + \dot{m}_{\phi.г} = \dot{m}_{\phi.ок} \frac{1 + K_m}{K_m} = \dot{m}_{\phi.г} (1 + K_m), \quad (85)$$

где  $K_m = \dot{m}_{\phi.ок} / \dot{m}_{\phi.г}$  – действительное массовое соотношение компонентов в элементарном смесителе – двухкомпонентной центробежной эмульсионной форсунке.

2.5.3.4. Отношение плотностей окислителя и горючего

$$e = \frac{\rho_{ок}}{\rho_\Gamma}. \quad (86)$$

2.5.3.5. Плотность эмульсии, образующейся при смешении окислителя и горючего в камере закручивания внешнего контура форсунки.

Плотность эмульсии определяется, исходя из свойства аддитивности объемов компонентов, составляющих смесь,

$$\frac{\dot{m}_\phi}{\rho_\phi} = \frac{\dot{m}_{\phi.ок}}{\rho_{ок}} + \frac{\dot{m}_{\phi.г}}{\rho_\Gamma}.$$

После соответствующих преобразований, получаем

$$\rho_\phi = \frac{\rho_{ок} \rho_\Gamma (1 + K_m)}{\rho_{ок} + K_m \rho_\Gamma} = \frac{\rho_{ок} (1 + K_m)}{K_m + e} = \frac{e \rho_\Gamma (1 + K_m)}{K_m + e} \quad (87)$$

2.5.3.6. Выбирается диаметр сопла форсунки  $d_{с.н}$ .

Для форсунки открытого типа  $d_{с.н} = D_{к.з.н}$ , а закрытого типа  $d_{с.н} < D_{к.з.н}$ . Чтобы улучшить качество распыла жидкости, рекомендуется выполнять форсунку закрытого типа, но иногда это неприемлемо по технологическим соображениям. В этом случае применяют форсунку открытого типа.

В первом приближении рекомендуется выбрать форсунку открытого типа.

При проектировании форсунки необходимо учитывать, что отношение  $R_{\text{вх.н}}/r_{\text{с.н}}$  должно быть в пределах 1...25, а отношение  $d_{\text{с.н}}/D_{\text{к.з.н}} = 0,2...1,0$  [2; 7].

2.5.3.7. Выбирается длина сопла форсунки  $l_{\text{с.н}}$ .

При этом следует выполнить условие, что относительная длина сопла форсунки  $\bar{l}_{\text{с.н}} = l_{\text{с.н}}/d_{\text{с.н}}$  должна находиться в диапазоне  $l_c = 0,2...1,0$ .

2.5.3.8. Эквивалентный диаметр входных тангенциальных отверстий наружного контура с общей площадью  $i_{\text{вх.н}} F_{\text{вх.н}}$

$$d_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{4i_{\text{вх.н}} F_{\text{вх.н}}}{\pi}} = d_{\text{вх.н}} \sqrt{i_{\text{вх.н}}} . \quad (88)$$

2.5.3.9. Динамическая вязкость образующейся эмульсии  $\eta_{\text{э}}$

$$\eta_{\text{э}} = \frac{\eta_{\Gamma} + K_m \eta_{\text{ок}}}{1 + K_m}, \quad (89)$$

где  $\eta_{\text{ок}}$  и  $\eta_{\Gamma}$  – динамические вязкости окислителя и горючего соответственно.

2.5.3.10. Число Рейнольдса на входе эмульсии в наружный контур двухкомпонентной форсунки с внутренним смешением

$$\text{Re}_{\text{вх.н}} = \frac{W_{\text{вх.э}} d_{\text{эк}} \rho_{\text{э}}}{\eta_{\text{э}}} = \frac{4\dot{m}_{\phi}}{\pi \eta_{\text{э}} d_{\text{эк}}}, \quad (90)$$

где  $W_{\text{вх.э}}$  – скорость эмульсии на входе в камеру закручивания при условии подачи её через тангенциальные входные отверстия внешнего контура;  $\eta_{\text{э}}$  – динамическая вязкость эмульсии;  $d_{\text{эк}}$  – эквивалентный диаметр входных отверстий внешнего контура.

2.5.3.11. Коэффициент трения, определяемый при условиях на входе во внешний контур форсунки эмульсии по эмпирической зависимости,

$$\lg \lambda = \frac{25,8}{\left(\lg \operatorname{Re}_{\text{вх.н}}\right)^{2,58}} - 2. \quad (92)$$

2.5.3.12. Геометрическая характеристика внешнего контура эмульсионной форсунки, являющаяся критерием гидродинамического подобия течения эмульсии во внешнем контуре форсунки, [15].

$$A_{\text{эм}} = \frac{\left( K_m \frac{R_{\text{вх.в}}}{R_{\text{вх.н}}} \sin \theta_{\text{вх.в}} + \sqrt{e} \sin \theta_{\text{вх.н}} \right) \sqrt{e}}{(1 + K_m)(K_m + e)} \frac{R_{\text{вх.н}} r_{\text{с.н}}}{i_{\text{вх.н}} r_{\text{вх.н}}^2}, \quad (93)$$

где  $\theta_{\text{вх.в}}$  и  $\theta_{\text{вх.н}}$  – углы наклона осей входных тангенциальных отверстий подачи окислителя и горючего к направлению оси двухкомпонентной форсунки во внутреннем и наружном контурах форсунки соответственно.

2.5.3.13. Эквивалентная геометрическая характеристика эмульсионной форсунки, учитывающая влияние вязкости эмульсии, образующейся в камере закручивания внешнего контура и вытекающей из форсунки,

$$A_{\text{э.эм}} = \frac{A_{\text{эм}}}{1 + \frac{\lambda}{2} A_{\text{эм}} \left( \frac{(R_{\text{вх.н}} + r_{\text{вх.н}})^2 + r_{\text{вх.н}}}{r_{\text{с.н}}^2} - 1 \right)}, \quad (94)$$

где  $\lambda$  – коэффициент трения эмульсии, определяемый при условиях на входе во внешний контур форсунки.

2.5.3.14. Коэффициент живого сечения сопла форсунки

$$\varphi_3 = 1 - \frac{r_{\text{жс.н}}^2}{r_{\text{с.н}}^2} = \frac{1}{\left( \sqrt[3]{\frac{A_{\text{э.эм}}}{2\sqrt{2}} + \sqrt{\frac{A_{\text{э.эм}}^2}{8} - \frac{1}{27}}} + \sqrt[3]{\frac{A_{\text{э.эм}}}{2\sqrt{2}} - \sqrt{\frac{A_{\text{э.эм}}^2}{8} - \frac{1}{27}}} \right)^2}. \quad (95)$$

2.5.3.15. Коэффициент расхода эмульсионной форсунки

$$\mu_3 = \varphi_3 \sqrt{\frac{\varphi_3}{2 - \varphi_3}}. \quad (96)$$

2.5.3.16. Средний угол факела распыла

$$\operatorname{tg} \bar{\alpha}_3 = \frac{2\mu_3 A_{3.эм}}{\sqrt{\left(1 + \sqrt{1 - \varphi_3}\right)^2 - 4\mu_3^2 A_{3.эм}^2}}. \quad (97)$$

2.5.3.17. Площадь и диаметр сопла наружного контура эмульсионной форсунки, обеспечивающие необходимый расход окислителя и горючего через эмульсионную форсунку при принятых перепадах давления на внутреннем  $\Delta p_{\phi.ок}$  и наружном  $\Delta p_{\phi.г}$  её контурах,

$$F_{\phi.н} = \frac{\pi d_{с.н}^2}{4} = \frac{\dot{m}_\phi}{\mu_3 \sqrt{2\rho_3 \Delta p_{\phi.г}}}, \quad (98)$$

$$d_{с.н} = \sqrt{\frac{4F_{\phi.э.н}}{\pi}}. \quad (99)$$

2.5.3.18. Радиус вихря жидкости или воздушного вихря в выходном сечении форсунки

$$r_{ж.н} = r_{с.н} \sqrt{1 - \varphi_3}. \quad (100)$$

2.5.3.19. Площадь живого сечения сопла форсунки

$$F_{ж.н} = \varphi_3 F_{с.н}. \quad (101)$$

2.5.3.20. Среднее значение осевой скорости эмульсии на выходе из форсунки

$$W_{а.э} = \frac{\dot{m}_\phi}{\rho_3 F_{ж.н}}. \quad (102)$$

2.5.3.21. Среднее значение абсолютной скорости эмульсии на выходе из форсунки

$$W_3 = \frac{W_{а.э}}{\cos \bar{\alpha}_3}. \quad (103)$$

2.5.3.22. Толщина пелены эмульсии на выходе из форсунки

$$\delta_{п.э} = r_{с.н} - r_{ж.н}. \quad (104)$$

2.5.3.23. Критерий Вебера

$$We = \frac{\rho_\kappa W_3^2 d_{с.н}}{\sigma_3}, \quad (105)$$

где  $\rho_k$  – плотность продуктов сгорания в сечении к–к на входе в камеру, куда происходит истечение компонента из форсунки;  $\sigma_3$  – коэффициент поверхностного натяжения впрыскиваемой эмульсии.

2.5.3.24. Критерий Лапласа

$$L_p = \frac{\rho_3 \delta_n \sigma_3}{\eta_3}, \quad (106)$$

где  $\eta_3$  – динамическая вязкость впрыскиваемой эмульсии.

2.5.3.25. Медианный диаметр образовавшихся капель в факеле распыла форсунки

$$d_m = 269 L_p^{-0,35} \left( \frac{We \rho_k}{\rho_3} \right)^{-0,483}. \quad (107)$$

В качестве дополнительных критериев оценки правильности спроектированной форсунки (целевой функции) могут использоваться величина среднего угла факела распыла  $2\bar{\alpha}$ , тонкость распыла эмульсии, оцениваемая медианным диаметром образовавшихся капель.

## **2.6. Двухкомпонентная струйно-центробежная газожидкостная форсунка с внешним смешением**

Двухкомпонентные струйно-центробежные газожидкостная форсунка с внешним смешением широко используются в ЖРД с дожиганием генераторного газа, работающих на самовоспламеняющихся компонентах топлива. Схема организации рабочего процесса в камере сгорания таких двигателей „газ – жидкость”.

Расчетная схема двухкомпонентной струйно-центробежной газожидкостной форсунки с внешним смешением приведена на рис.18. Форсунка состоит из внешнего и внутреннего контуров. Оба контура работают и рассчитываются независимо друг от друга.

Проектный расчет такой двухкомпонентной струйно-центробежной газожидкостной форсунки начинается с внутреннего контура и проводится следующим образом.

## 2.6.1. Проектный расчет внутреннего контура двухкомпонентной газожидкостной форсунки

Внутренний контур двухкомпонентной струйно-центробежной газожидкостной форсунки с внешним смешением представляет собой однокомпонентную струйную газовую форсунку окислителя (генераторного газа окислительного газогенератора).

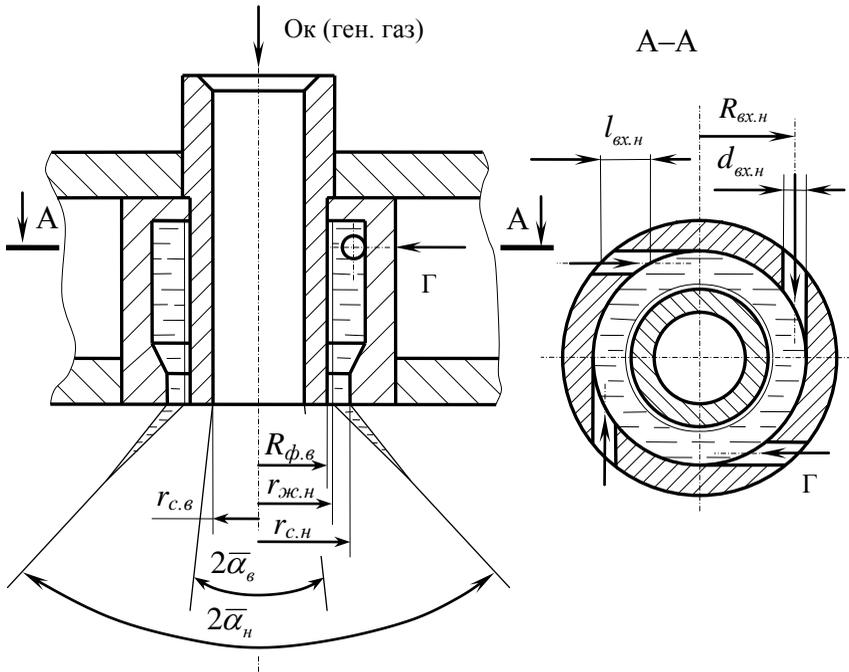


Рис. 18. Расчетная схема двухкомпонентной струйно-центробежной газожидкостной форсунки с внешним смешением

Проектный расчет такой форсунки проводится в следующей последовательности.

2.6.1.1. Выбирается в первом приближении диаметр проходного сечения или диаметр сопла форсунки на выходе  $d_{с.в}$ .

Этот диаметр может находиться в пределах  $0,5 \text{ мм} \leq d_{c.с} \leq D_{ф.с}$ .

В первой итерации его можно принять равным 4...6 мм.

2.6.1.2. Определяется в первом приближении длина форсунки или длина сопла форсунки  $l_{c.с}$ .

Газовая струйная форсунка подает окислительный генераторный газ из полости смесительной головки, расположенной между средним и наружным днищами. Поэтому при определении её длины следует учитывать толщины среднего и огневого днищ, расстояние между ними и величины выступов форсунки над средним и огневым днищами.

Толщина огневого и среднего днищ находится в интервале 2,0...3,0 мм, а расстояние между днищами составляет – 8...12 мм [7].

2.6.1.3. Выбирается форма кромки канала со стороны входа компонента в форсунку.

Форма кромки канала струйной форсунки на входе может быть острой, закругленной по радиусу или с фаской. Газовые форсунки с острой входной кромкой в смесительных головках ЖРД практически не используются. Наиболее часто применяются форсунки с фаской.

2.6.1.4. Находится относительная длина струйной форсунки, т.е. отношение  $\frac{l_{c.с}}{d_{c.с}}$ .

2.6.1.5. Площадь сопла форсунки на выходе

$$F_{ф.с} = \frac{\pi d_{c.с}^2}{4} \quad (108)$$

2.6.1.6. Число Рейнольдса

$$Re = \frac{4\dot{m}_{ф.гг}}{\pi \eta_{гг} d_{c.с}}, \quad (109)$$

где  $\dot{m}_{ф.гг}$  – массовый расход генераторного газа через одну форсунку,  $\eta_{гг}$  – динамическая вязкость генераторного газа, подаваемого через форсунку.

Значение динамической вязкости окислительного генераторного газа определяется по справочнику [8] для заданного топлива при максимальном значении коэффициента избытка окислителя, имеющимся в таблице и давлении, близком к давлению на входе в форсунку.

2.6.1.7. Среднее значение скорости генераторного газа на выходе из форсунки

$$W_{\Gamma\Gamma} = \frac{\dot{m}_{\phi,\Gamma\Gamma}}{\rho_{\Gamma\Gamma} F_{\phi,\epsilon}}, \quad (110)$$

где  $\rho_{\Gamma\Gamma}$  – плотность генераторного газа на входе в форсунку.

2.6.1.8. Коэффициент расхода форсунки

$$\mu = \left( 1,23 + \frac{58 l_{c,\epsilon}}{\text{Re } d_{c,\epsilon}} \mu \right)^{-1} \text{ или} \quad (111)$$

$$\mu = \frac{\sqrt{1,23^2 + 232 l_{c,\epsilon} / \text{Re } d_{c,\epsilon}}}{116 l_{c,\epsilon} / \text{Re } d_{c,\epsilon}}. \quad (112)$$

2.6.1.9. Давление генераторного газа на входе в форсунку

$$P_{\text{ex.}\Gamma\Gamma} = P_{\kappa} + \Delta p_{\phi,\epsilon}, \quad (113)$$

где  $P_{\kappa}$  – давление на входе в камеру сгорания,  $\Delta p_{\phi,\epsilon}$  – перепад давления на внутреннем контуре двухкомпонентной форсунки или струйной газовой форсунке.

2.6.1.10. Плотность генераторного газа на входе в форсунку

$$\rho_{\Gamma\Gamma} = \frac{P_{\text{ex.}\Gamma\Gamma}}{R_{\Gamma\Gamma} T_{\text{ex.}\Gamma\Gamma}}, \quad (114)$$

где  $T_{\text{ex.}\Gamma\Gamma}$  – температура генераторного газа на входе в форсунку.

2.6.1.11. Площадь сопла форсунки на выходе

$$F_{\phi,\epsilon} = \frac{\dot{m}_{\phi,\Gamma\Gamma}}{\mu \rho_{\Gamma\Gamma} \left( \frac{P_{\kappa}}{P_{\text{ex.}\Gamma\Gamma}} \right)^{\frac{1}{n}} \sqrt{2 \frac{n}{n-1} R_{\Gamma\Gamma} T_{\text{ex.}\Gamma\Gamma} \left[ 1 - \left( \frac{P_{\kappa}}{P_{\text{ex.}\Gamma\Gamma}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]}}. \quad (115)$$

2.6.1.12. Диаметр сопла форсунки, обеспечивающей требуемый массовый расход генераторного газа при выбранном перепаде давления на форсунке,

$$d_{c.г} = \sqrt{\frac{4F_{ф.г}}{\pi}}. \quad (116)$$

Если диаметр отличается от принятого значения или полученного в предыдущей итерации, то расчет форсунки повторяется при новом значении диаметра.

При отличии значений диаметров менее 3% расчет прекращается.

2.6.1.13. Наружный диаметр газовой форсунки окислителя, являющейся внутренним контуром двухкомпонентной струйно-центробежной газожидкостной форсунки с внешним смешением  $D_{ф.г}$  (см. рис.18).

$$D_{ф.г} = d_{c.г} + 2\delta_{ст.вн}, \quad (117)$$

где  $\delta_{ст.вн}$  – толщина стенки струйной газовой форсунки.

Не желательно иметь толщину стенки менее 0,5 мм.

## **2.6.2. Проектный расчет наружного контура двухкомпонентной газожидкостной форсунки**

Наружный контур двухкомпонентной струйно-центробежной газожидкостной форсунки с внешним смешением представляет собой однокомпонентную центробежную жидкостную форсунку горючего. Проектный расчет такой форсунки проводится в следующей последовательности.

2.6.2.1. Задаются числом входных тангенциальных отверстий  $i_{вх.н}$ .

Число входных тангенциальных отверстий может быть в пределах  $i_{вх.н} = 2...6$  [2]. В общем случае  $i_{вх.н}$  может быть больше шести и доходить до 12, но располагаться тогда они должны на нескольких уровнях (ярусах).

2.6.2.2. Задаются диаметром входного тангенциального отверстия  $d_{\text{вх.н}}$ .

Рекомендуемый диапазон диаметров  $d_{\text{вх.н}} = 0,5 \dots 2,5$  мм [2].

Число тангенциальных отверстий  $i_{\text{вх.н}}$  и их диаметр  $d_{\text{вх.н}}$  необходимо увязать между собой таким образом, чтобы в одном уровне не было перекрытия соседних тангенциальных отверстий и струи закручивались в камере закручивания форсунки, не распадаясь.

2.6.2.3. Находится диаметр камеры закручивания форсунки  $D_{\text{к.з.н}}$  по известному наружному диаметру внутреннего контура двухкомпонентной струйно-центробежной форсунки  $D_{\text{ф.в}}$ , определенному в разделе 2.6.1.13,

$$D_{\text{к.з.н}} \geq D_{\text{ф.в}} + 2d_{\text{вх.н}}, \quad (118)$$

где  $d_{\text{вх.н}}$  – диаметр входного тангенциального отверстия наружного контура двухкомпонентной форсунки.

2.6.2.4. На поперечном разрезе нужного сечения чертежа форсунки, выполненного в масштабе 10:1, замеряется длина входного тангенциального отверстия  $l_{\text{вх.н}}$  (см. рис. 18).

2.6.2.5. Определяется отношение  $l_{\text{вх.н}}/d_{\text{вх.н}}$ .

Оно должно быть в интервале от 1,5 до 6,0. [7]. Если полученное значение  $l_{\text{вх.н}}/d_{\text{вх.н}}$  выходит за указанный интервал, то необходимо скорректировать соответствующим образом  $D_{\text{к.з.н}}$ ,  $d_{\text{вх.н}}$  или  $D_{\text{ф.в}}$ .

2.6.2.6. Длина камеры закручивания

$$l_{\text{к.з.н}} = \bar{l}_{\text{к.з.н}} \cdot D_{\text{к.з.н}}, \quad (119)$$

где  $\bar{l}_{\text{к.з.н}}$  – относительная длина камеры закручивания центробежной форсунки.

Относительная длина камеры закручивания должна находиться в пределах  $\bar{l}_{\text{к.з.н}} = 0,5 \dots 3,0$  [2].

Центробежная форсунка, являясь наружным контуром двухкомпонентной струйно-центробежной газожидкостной форсунки, подает жидкое горючее из полости смесительной головки, расположен-

ной между средним и огневым днищами, поэтому при определении её длины следует учитывать толщину лишь огневого днища и расстояние между огневым и средним днищами.

Толщина огневого и среднего днищ находится в интервале 2,0...3,0 мм, а расстояние между днищами составляет – 8...12 мм [7].

2.6.2.7. Выбирается угол наклона образующей конической поверхности перехода от камеры закручивания к соплу  $\varphi_c$

Существуют следующие рекомендации [2] по выбору этого угла  $\varphi_c = 30...85^\circ$ .

2.6.2.8. Радиус от оси форсунки, на котором расположена ось входного тангенциального отверстия,

$$R_{\text{вх.н}} = R_{\text{к.з.н}} - r_{\text{вх.н}}. \quad (120)$$

2.6.2.9. Выбирается диаметр сопла форсунки  $d_{\text{с.н}}$ .

Для форсунки открытого типа  $d_{\text{с.н}} = D_{\text{к.з.н}}$ , а закрытого типа  $d_{\text{с.н}} < D_{\text{к.з.н}}$ . Чтобы улучшить качество распыла жидкости, рекомендуется выполнять форсунку закрытого типа, но иногда это бывает неприемлемым по технологическим соображениям. В этом случае применяют форсунку открытого типа.

В первом приближении рекомендуется выбрать форсунку открытого типа.

При проектировании форсунки необходимо учитывать, что отношение  $R_{\text{вх.н}}/r_{\text{с.н}}$  должно быть в пределах 1...25, а отношение  $d_{\text{с.н}}/D_{\text{к.з.н}} = 0,2...1,0$ .

2.6.2.10. Выбирается длина сопла форсунки  $l_{\text{с.н}}$ .

$$l_{\text{с.н}} = \bar{l}_{\text{с.н}} \cdot d_{\text{с.н}}, \quad (121)$$

При выборе следует выполнить условие, что относительная длина сопла форсунки  $\bar{l}_{\text{с.н}}$  должна находиться в интервале  $\bar{l}_{\text{с.н}} = 0,2...1,0$ .

2.6.2.11. Геометрическая характеристика центробежной форсунки горючего

$$A = \frac{R_{\text{вх.н}} r_{\text{с.н}}}{i_{\text{вх.н}} r_{\text{вх.н}}^2}. \quad (122)$$

В общем случае, когда оси тангенциальных входных отверстий имеют с осью форсунки угол, отличный от прямого угла, имеем

$$A = \frac{R_{\text{вх.н}} r_{\text{с.н}}}{i_{\text{вх.н}} r_{\text{вх.н}}^2} \sin \theta, \quad (123)$$

где  $\theta$  – угол между осью входного тангенциального отверстия и направлением оси форсунки.

2.6.2.12. Число Рейнольдса на входе в форсунку

$$\text{Re}_{\text{вх}} = \frac{4 \dot{m}_{\phi\Gamma}}{\pi \eta_{\Gamma} d_{\text{вх.н}} \sqrt{i_{\text{вх.н}}}}, \quad (124)$$

где  $\eta_{\Gamma}$  – динамическая вязкость горючего, подаваемого через форсунку.

2.6.2.13. Коэффициент трения при условии на входе в форсунку  $\lambda$  определяется с помощью эмпирической зависимости

$$\lg \lambda = \frac{25,8}{(\lg \text{Re}_{\text{вх}})^{2,58}} - 2. \quad (125)$$

2.6.2.14. Эквивалентная геометрическая характеристика форсунки, учитывающая влияние вязкости реальной жидкости, подаваемой через форсунку

$$A_3 = \frac{A}{1 + \frac{\lambda}{2} R_{\text{вх.н}} (R_{\text{вх.н}} + d_{\text{вх.н}} - r_{\text{с.н}})}, \quad (126)$$

где  $\lambda$  – коэффициент трения, определяемый при условии на входе в форсунку.

2.6.2.15. Коэффициент живого сечения сопла форсунки

$$\varphi = 1 - \frac{r_{\text{ж.н}}^2}{r_{\text{с.н}}^2} = \frac{1}{\left( \sqrt[3]{\frac{A_3}{2\sqrt{2}}} + \sqrt{\frac{A_3^2}{8} - \frac{1}{27}} + \sqrt[3]{\frac{A_3}{2\sqrt{2}}} - \sqrt{\frac{A_3^2}{8} - \frac{1}{27}} \right)^2}. \quad (127)$$

2.6.2.16. Коэффициент расхода центробежной форсунки горючего

$$\mu = \varphi \sqrt{\frac{\varphi}{2 - \varphi}}. \quad (128)$$

2.6.2.17. Средний угол факела распыла

$$\operatorname{tg} \bar{\alpha} = \frac{2\mu A_3}{\sqrt{(1 + \sqrt{1 - \varphi})^2 - 4\mu^2 A_3^2}}. \quad (129)$$

Для контроля правильности расчетов и принятия дальнейших проектных решений на рис. 15 представлены графики зависимостей коэффициентов живого сечения  $\varphi$ , расхода  $\mu$  и среднего угла факела распыла  $2\bar{\alpha}$  от действительной геометрической характеристики центробежной форсунки  $A$  или эквивалентной –  $A_3$ .

2.6.2.18. Площадь сопла форсунки

$$F_{\phi.n} = \frac{\pi d_{c.n}^2}{4}. \quad (130)$$

2.6.2.19. Потребный перепад давления на форсунке горючего, обеспечивающий необходимый расход жидкого горючего через форсунку

$$\Delta p_{\phi.g} = \frac{\dot{m}_{\phi.g}^2}{2\rho_g \mu^2 F_{\phi.n}^2}, \quad (131)$$

где  $\rho_g$  – плотность жидкого горючего перед форсункой.

Полученный перепад давления на форсунке  $\Delta p_{\phi.g}$  не должен выходить за пределы рекомендованного интервала (11) и должен быть равен или быть чуть меньше перепада, принятого ранее в разделе 3.3.1. первой курсовой работы «Термодинамический расчет и проектирование камер ЖРД». Если это не выполняется, то необходимо изменить  $d_{c.n}$ , принятый в первом приближении. Более точное значение  $d_{c.n}$  для следующей итерации можно получить, используя уравнение (45), записанное в явном виде относительно площади сопла форсунки  $F_{\phi.n}$ . Можно изменить геометрические размеры форсунок, назначенные в первом приближении. Прежде следует изме-

нить в соответствующем направлении диаметр входного тангенциального отверстия  $d_{вх.н}$  и их число  $i_{вх.н}$ . В крайнем случае можно изменить число форсунок  $n$ , схему их расположения на смесительной головке, внешний диаметр форсунки  $D_{\phi}$  или даже диаметр камеры сгорания на входе  $D_{к}$ . Может быть придется изменить и принятый ранее тип форсуночной головки.

**Внимание.** При проектировании пристеночных форсунок необходимо выполнить условия равенства перепадов давления на ядерных и пристеночных форсунках

$$\Delta p_{\phi.ок.я} = \Delta p_{\phi.ок.нр}, \quad \Delta p_{\phi.г.я} = \Delta p_{\phi.г.нр} \quad (132)$$

2.6.2.20. Радиус вихря жидкости или воздушного вихря в выходном сечении форсунки

$$r_{ж.н} = r_{с.н} \sqrt{1 - \varphi}. \quad (133)$$

2.6.2.21. Площадь живого сечения сопла форсунки

$$F_{ж.н} = \varphi F_{с.н}. \quad (134)$$

2.6.2.22. Среднее значение осевой скорости горючего на выходе из форсунки

$$W_a = \frac{\dot{m}_{\phi.г}}{\rho_{г} F_{ж.н}}. \quad (135)$$

2.6.2.23. Среднее значение абсолютной скорости горючего на выходе из форсунки

$$W = \frac{W_a}{\cos \bar{\alpha}}. \quad (136)$$

2.6.2.24. Толщина пелены горючего на выходе из форсунки

$$\delta_n = r_{с.н} - r_{ж.н}. \quad (137)$$

2.4.1.25. Критерий Вебера

$$We = \frac{\rho_{к} W^2 d_{с.н}}{\sigma_{г}}, \quad (138)$$

где  $\rho_{к}$  – плотность продуктов сгорания в сечении к–к на входе в камеру, куда происходит истечение компонента из форсунки;  $\sigma_{г}$  – коэффициент поверхностного натяжения впрыскиваемого горючего.

#### 2.6.2.26. Критерий Лапласа

$$L_p = \frac{\rho_{\text{ex}} \delta_n \sigma_r}{\eta_r}, \quad (139)$$

где  $\eta_r$  – динамическая вязкость впрыскиваемого жидкого горючего.

2.6.2.27. Медианный диаметр образовавшихся капель в факеле распыла форсунки

$$d_m = 259 L_p^{-0,35} \left( \frac{W \rho_\kappa}{\rho_{\text{ex}}} \right)^{-483}. \quad (140)$$

В качестве дополнительных критериев оценки правильности спроектированной форсунки (целевой функции) могут использоваться величина среднего угла факела распыла  $2\bar{\alpha}$  или тонкость распыла, оцениваемая медианным диаметром образовавшихся капель.

2.6.2.28. Чертится спроектированная двухкомпонентная струйно-центробежная газожидкостная форсунка с внешним смешением по полученным геометрически размерам в масштабе 10:1.

### **2.7. Двухкомпонентная струйно-центробежная газожидкостная форсунка с внутренним смешением**

Двухкомпонентные струйно-центробежные газожидкостные форсунки с внутренним смешением широко используются в ЖРД с дожиганием генераторного газа, работающих на несамовоспламеняющихся компонентах топлива. Схема организации рабочего процесса в камере сгорания таких двигателей „газ – жидкость”.

Расчетная схема двухкомпонентной струйно-центробежной газожидкостной форсунки с внутренним смешением приведена на рис.19.

Форсунка состоит из наружного и внутреннего контуров. Внутренний контур представляет собой однокомпонентную струйную газовую форсунку окислителя, т.е. окислительного генераторного газа. Наружный контур представляет собой однокомпонентную центробежную жидкостную форсунку горючего. Оба контура работают и рассчитываются независимо друг от друга.

Проектный расчет такой форсунки начинается с внутреннего контура и проводится так же, как расчет двухкомпонентной струйно-центробежной газожидкостной форсунки с внешним смешением компонентов.

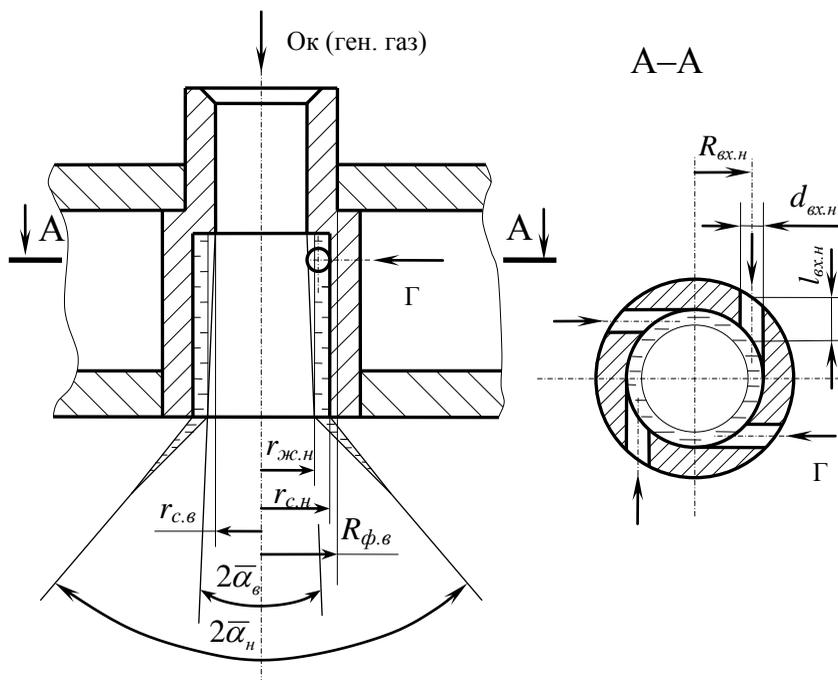


Рис. 19. Расчетная схема двухкомпонентной струйно-центробежной газожидкостной форсунки с внутренним смешением

2.7.1. Рассчитывается однокомпонентная струйная газовая форсунка окислителя (окислительного генераторного газа).

Выполняются последовательно разделы 2.6.1.1...2.6.1.13 настоящего учебного пособия.

2.7.2. Рассчитывается однокомпонентная центробежную жидкостную форсунку горючего.

Для этого последовательно выполняются разделы 2.6.2.1...2.6.2.27 настоящего учебного пособия.

2.7.3. Чертится спроектированная двухкомпонентная струйно-центробежная газожидкостная форсунка с внешним смешением полученных геометрически размерам в масштабе 10:1.

При проектировании наружного контура двухкомпонентной струйно-центробежной газожидкостной форсунки с внутренним смешением необходимо выполнить следующие дополнительные требования:

1. Струя генераторного газа, вытекающая из внутреннего контура в камеру закручивания наружного контура не должен мешать струям жидкого горючего, подаваемым через тангенциальные отверстия наружного контура, свободно закрутиться и растечься по поверхности камеры закручивания. Для этого должно быть выполнено соотношение

$$d_{с.в} \leq D_{к.з.н} - 2d_{вх.н}, \quad (141)$$

где  $D_{к.з.н}$  и  $d_{вх.н}$  – диаметры камеры закручивания и входного

тангенциального отверстия наружного контура форсунки соответственно (см. рис. 19).

2. Струя окислительного генераторного газа, вытекающая из сопла внутреннего контура двухкомпонентной центробежно-центробежной жидкостной форсунки должен полностью располагаться внутри воздушного вихря наружного контура этой форсунки. Для этого нужно иметь

$$d_{с.в} = d_{ж.н} - 2 \frac{l_{к.з.н}}{\cos \bar{\alpha}_g}, \quad (142)$$

где  $d_{ж.н} = 2r_{ж.н}$  – диаметр воздушного вихря или вихря жидкости центробежной форсунки горючего;  $l_{к.з.н}$  – длина камеры закручивания наружного контура двухкомпонентной форсунки;  $\bar{\alpha}_g$  – угол распыла струйной газовой форсунки.

В первом приближении можно принять средний угол распыла  $2\bar{\alpha}_g = 10^\circ$ .

## 2.8. Двухкомпонентная струйно-струйная газовая форсунка с внешним смешением

Двухкомпонентные струйно-струйные газовые форсунки с внешним смешением широко используются в ЖРД с дожиганием генераторного газа, которые работают на самовоспламеняющихся компонентах топлива. Схема организации рабочего процесса в камере сгорания таких двигателей „газ – газ”.

Расчетная схема двухкомпонентной струйно-струйной газовой форсунки с внешним смешением приведена на рис. 20.

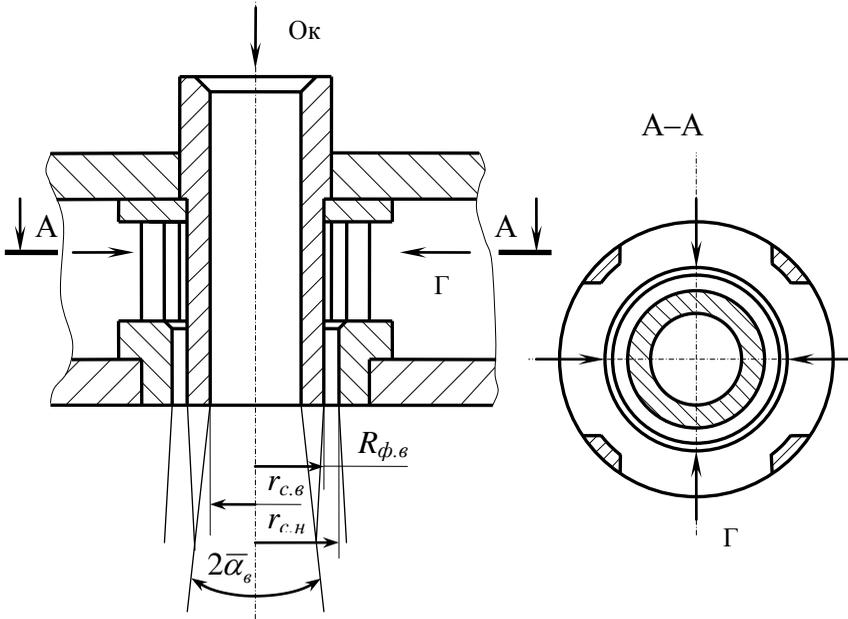


Рис.20. Расчетная схема двухкомпонентной струйно-струйной газовой форсунки с внешним смешением

Форсунка состоит из внешнего и внутреннего контуров. Внутренний контур представляет собой однокомпонентную струйную газовую форсунку окислителя, т.е. окислительного генераторного

газа. Наружный контур – однокомпонентную кольцевую струйную газовую форсунку горючего, т.е. восстановительного генераторного газа. Оба контура работают и рассчитываются независимо друг от друга.

Проектный расчет такой форсунки начинается с внутреннего контура и проводится в следующей последовательности.

2.8.1. Рассчитывается однокомпонентная струйная газовая форсунка окислителя, подающая в камеру сгорания окислительный генераторный газ.

Выполняются последовательно разделы 2.6.1.1...2.6.1.13 настоящего учебного пособия.

2.8.2. Рассчитывается однокомпонентная струйная газовая форсунка горючего, подающая в камеру сгорания восстановительный генераторный газ.

Отличие методики расчета кольцевой струйной форсунки состоит в том, что используется понятие эквивалентного диаметра  $d_{с.э.н}$ .

В первом приближении его можно принять равным 4...6 мм, а коэффициент расхода кольцевой струйной форсунки горючего  $\mu = 0,81...0,85$ .

Выполняются последовательно разделы 2.6.1.1...2.6.1.11 настоящего учебного пособия. Далее определяются:

2.8.2.12. Эквивалентный диаметр сопла форсунки, обеспечивающий требуемый массовый расход генераторного газа при выбранном перепаде давления на форсунке

$$d_{с.э.н} = \sqrt{\frac{4F_{\phi.э.н}}{\pi}}. \quad (143)$$

Если диаметр отличается от принятого значения или полученного в предыдущей итерации, то расчет форсунки повторяется с раздела 2.8.2.4. при новом значении диаметра. Расчет прекращается, если значения диаметров в последней и предыдущей итерациях отличается не более чем на 0,5 %.

2.8.2.13. Наружный диаметр сопла кольцевой струйной газовой форсунки горючего  $d_{с.н}$  (см. рис.20).

$$d_{с.н} = \sqrt{\frac{4F_{\phi.э.н}}{\pi} + D_{\phi.в}^2}. \quad (144)$$

2.8.2.14. Диаметр корпуса наружного контура форсунки или диаметр корпуса двухкомпонентной форсунки (см. рис. 20).

$$D_{\phi,н} = d_{с,н} + 2\delta_{ст,н}. \quad (145)$$

2.8.3. Чертится спроектированная двухкомпонентная струйно-струйная газовая форсунка с внешним смешением по полученным геометрически размерам в масштабе 10:1.

## 2.9. Двухкомпонентная струйно-струйная газовая форсунка с внутренним смешением

Двухкомпонентные струйно-струйные газовые форсунки с внутренним смешением широко используются в ЖРД с дожиганием генераторного газа, которые работают на несамовоспламеняющихся компонентах топлива.

Схема организации рабочего процесса в камере сгорания таких двигателей „газ – газ”.

Расчетная схема двухкомпонентной струйно-струйной газовой форсунки с внутренним смешением приведена на рис. 21.

Форсунка состоит из внешнего и внутреннего контуров. Внутренний контур представляет собой однокомпонентную струйную газовую форсунку окислителя, т.е. окислительного генераторного газа. Наружный

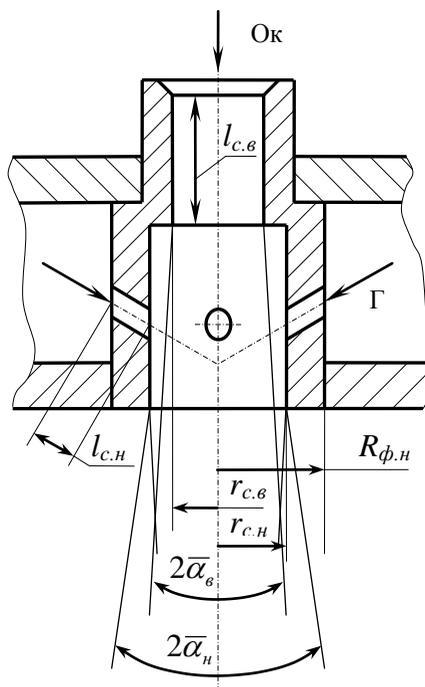


Рис.21 Расчетная схема двухкомпонентной струйно-струйной газовой или газожидкостной форсунки с внутренним смешением

контур – однокомпонентные струйные газовые форсунки горючего (восстановительного генераторного газа). Оба контура рассчитываются независимо друг от друга.

Проектный расчет такой двухкомпонентной форсунки начинается с внутреннего контура и проводится в следующей последовательности.

2.9.1. Рассчитывается однокомпонентная струйная газовая форсунка окислителя, подающая в камеру сгорания окислительный генераторный газ.

Выполняются разделы 2.6.1.1... 2.6.1.12 настоящего учебного пособия.

2.9.2. Определяется площадь сопла двухкомпонентной форсунки на выходе

$$F_{\phi} = F_{\phi,в} + F_{\phi,н} = \frac{\dot{m}_{\phi,в,ГГ}}{\mu \rho_{\text{вх.ГГ}} \left( \frac{p_{\kappa}}{p_{\text{вх.ГГ}}} \right)^{\frac{1}{n}} \sqrt{2 \frac{n}{n-1} R_{\text{ГГ}} T_{\text{вх.ГГ}} \left[ 1 - \left( \frac{p_{\kappa}}{p_{\text{вх.ГГ}}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]}} + \frac{\dot{m}_{\phi,н,ГГ}}{\mu \rho_{\text{вх.ГГ}} \left( \frac{p_{\kappa}}{p_{\text{вх.ГГ}}} \right)^{\frac{1}{n}} \sqrt{2 \frac{n}{n-1} R_{\text{ГГ}} T_{\text{вх.ГГ}} \left[ 1 - \left( \frac{p_{\kappa}}{p_{\text{вх.ГГ}}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]}} , \quad (146)$$

где  $\dot{m}_{\phi,в,ГГ}$  – массовый расход окислительного генераторного газа через внутренний контур двухкомпонентной форсунки;  $\dot{m}_{\phi,н,ГГ}$  – массовый расход восстановительного генераторного газа через наружный контур той же двухкомпонентной форсунки.

2.9.3. Диаметр сопла двухкомпонентной форсунки на выходе

$$d_{c,\phi} = \sqrt{\frac{4 F_{\phi}}{\pi}} . \quad (147)$$

2.9.4. Рассчитывается однокомпонентная струйная газовая форсунка горючего, подающая в камеру сгорания восстановительный генераторный газ.

Выполняются последовательно разделы 2.6.1.1...2.6.1.13 настоящего учебного пособия.

Если число струйных газовых форсунок в наружном контуре двухкомпонентной форсунки  $n_\phi$ , то расход восстановительного генераторного газа через одну форсунку будет

$$\dot{m}_{\phi.н.гг} = \frac{\dot{m}_{\phi.н.гг}}{n_\phi}, \quad (148)$$

где  $\dot{m}_{\phi.н.гг}$  – массовый расход восстановительного генераторного газа через наружный контур двухкомпонентной форсунки.

2.9.5. Чертится на компьютере спроектированная двухкомпонентная струйно-струйная газовая форсунка с внутренним смешением по полученным геометрически размерам в масштабе 10:1.

**Внимание!** При проектировании пристеночных форсунок необходимо выполнить условия равенства перепадов давления на ядерных и пристеночных форсунках

$$\Delta p_{\phi.окя} = \Delta p_{\phi.окпр}, \quad \Delta p_{\phi.г.я} = \Delta p_{\phi.г.пр} \quad (149)$$

## 2.10. Двухкомпонентная струйно-струйная газожидкостная форсунка с внутренним смешением

Двухкомпонентные струйно-струйные газожидкостные форсунки с внутренним смешением используются в ЖРД с дожиганием генераторного газа, которые работают на несамовоспламеняющихся, чаще всего криогенных, компонентах топлива. Схема организации рабочего процесса в камере сгорания таких двигателей „газ – жидкость”.

Расчетная схема двухкомпонентной струйно-струйной газожидкостной форсунки с внутренним смешением приведена на рис. 21.

Форсунка состоит из наружного и внутреннего контуров. Внутренний контур представляет собой однокомпонентную струйную газовую форсунку окислителя, т.е. окислительного генераторного газа. Наружный контур – однокомпонентную струйную жидкостную форсунку (или форсунки) горючего. Смешение газового окислителя

и жидкого горючего происходит внутри двухкомпонентной форсунки. Из сопла форсунки вытекает газожидкостная струя топливной смеси.

Оба контура такой форсунки рассчитываются независимо друг от друга, причем расчет начинается с внутреннего контура.

Проектный расчет такой двухкомпонентной струйно-струйной газожидкостной форсунки с внутренним смешением и проводится в следующей последовательности.

2.10.1. Рассчитывается однокомпонентная струйная газовая форсунка окислителя, подающая в КС окислительный генераторный газ.

Выполняются последовательно разделы 2.6.1.1...2.6.1.12 настоящего учебного пособия.

2.10.2. Рассчитывается однокомпонентная струйная жидкостная форсунка горючего.

Выполняются последовательно разделы 2.1.1...2.1.10 настоящего учебного пособия.

Если число струйных жидкостных форсунок горючего в наружном контуре двухкомпонентной форсунки  $n_{\phi}$ , то массовый расход горючего через одну форсунку будет

$$\dot{m}_{1\phi.n.\Gamma} = \frac{\dot{m}_{\phi.n.\Gamma}}{n_{\phi,\Gamma}}, \quad (150)$$

где  $\dot{m}_{\phi.n.\Gamma}$  – массовый расход горючего через наружный контур двухкомпонентной форсунки.

2.10.3. Определяется площадь сопла двухкомпонентной форсунки на выходе

$$F_{\phi} = F_{\phi.\epsilon} + F_{\phi.n} = \frac{\dot{m}_{\phi.\epsilon.\Gamma}}{\mu \rho_{\epsilon.\Gamma} \left( \frac{p_{\kappa}}{p_{\epsilon.\Gamma}} \right)^{\frac{1}{n}} \sqrt{2 \frac{n}{n-1} R_{\Gamma} T_{\epsilon.\Gamma} \left[ 1 - \left( \frac{p_{\kappa}}{p_{\epsilon.\Gamma}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]}} + \frac{\dot{m}_{\phi.n.\Gamma}}{\rho_{\Gamma} W_{\Gamma}}, \quad (151)$$

где  $\dot{m}_{\phi.в.гг}$  – массовый расход окислительного генераторного газа через внутренний контур двухкомпонентной струйно-струйной газожидкостной форсунки;  $\dot{m}_{\phi.н.г}$  – массовый расход жидкого горючего через наружный контур двухкомпонентной форсунки,  $\rho_r$  – плотность жидкого горючего при температуре на входе в форсунку.

Если давление в камере сгорания выше критического давления горючего, то горючее переходит в газ по всему объему струи и плотность следует брать для газообразного горючего при давлении в камере сгорания и температуре на входе в форсунку. Определяется плотность по уравнению Клайперона-Менделеева:

$$\rho_r = \frac{P_k}{R_{\phi} T_{вх.\phi.н.г}} \quad (152)$$

2.10.4. Минимальный диаметр сопла двухкомпонентной форсунки на выходе

$$d_{с.ф} = \sqrt{\frac{4 F_{\phi}}{\pi}} \quad (153)$$

2.10.5. Чертится спроектированная двухкомпонентная струйно-струйная газожидкостная форсунка с внутренним смешением по полученным геометрически размерам в масштабе 10:1.

**Внимание!** При проектировании пристеночных форсунок необходимо выполнить условия равенства перепадов давления на ядерных и пристеночных форсунках

$$\Delta p_{\phi.ок.я} = \Delta p_{\phi.ок.нр}, \quad \Delta p_{\phi.г.я} = \Delta p_{\phi.г.нр} \quad (154)$$

### **3. ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПРОЕКТИРОВАННЫХ ФОРСУНОК С ПОМОЩЬЮ САПР «СМЕСЕОБРАЗОВАНИЕ В ЖРД»**

Правильность принятых студентом проектных решений и корректность проведенных расчетов в разработанной им форсунке можно выполнить с помощью созданной на кафедре ТДЛА подсистемы автоматизированного проектирования смесеобразования в ЖРД. Она позволяет провести машинный эксперимент по параметрическому исследованию спроектированной форсунки.

Основные функции САПР «Смесеобразование в ЖРД» следующие:

1. Ведение базы данных студенческих проектов:
  - сохранность базы;
  - пополнение базы реальными проектами;
  - удаление ненужных проектов;
  - редактирование имеющихся проектов.
2. Автоматизированное проектирование системы смесеобразования в ЖРД:
  - смесительной головки;
  - ядерных и пристеночных форсунок.
3. Обеспечение пользователя необходимой справочной информацией.
4. Сохранение твердых копий проектов.

Перед работой с программой необходимо ознакомиться с инструкцией пользователя.

#### **3.1. Инструкция пользователя**

##### **3.1.1. Инсталляция программы на жесткий диск**

Для инсталляции программы на IBM PC совместимый компьютер необходимо произвести следующие действия:

- Вставить компакт-диск (CD) в привод для чтения компакт-дисков (CD ROM).
- В операционной системе выбрать CD ROM.

- Запустить файл «Setup\_fors.exe».
- Следуя указаниям инсталлятора, на запрос инсталлятора «Установить» нажмите «Далее». Установка производится на диск C:\Forsunki\. Ярлык для программы находится в меню «Пуск», «Программы».

### 3.1.2. Удаление и восстановление программы

Для удаления и восстановления программы запустите файл «Setup\_fors.exe». На запрос инсталлятора «Удаление» или «Восстановление» выберите нужный пункт и нажмите «Далее».

### 3.1.3. Ведение базы данных проектов

Перед началом работы в программе необходимо зарегистрироваться в базе данных (БД) проектов. Для этого нажмите F2 или кнопку  на верхней панели инструментов. Вы увидите окно базы данных (см. рис. 22).

Для регистрации в БД нажмите кнопку , введите свои ФИО и № группы и нажмите кнопку .

Удаление записи из БД осуществляется нажатием кнопки .

Для изменение записи нажмите кнопку , а после изменения – кнопку .

Перемещение по БД производится следующими кнопками:

-  – начало списка;
-  – конец списка;
-  – предыдущая запись;
-  – следующая запись.

Поиск нужной записи может осуществляться по ФИО или номеру группы. Для этого необходимо выбрать соответствующую за-

кладку, ввести в поле параметры поиска и нажать кнопку «Поиск».

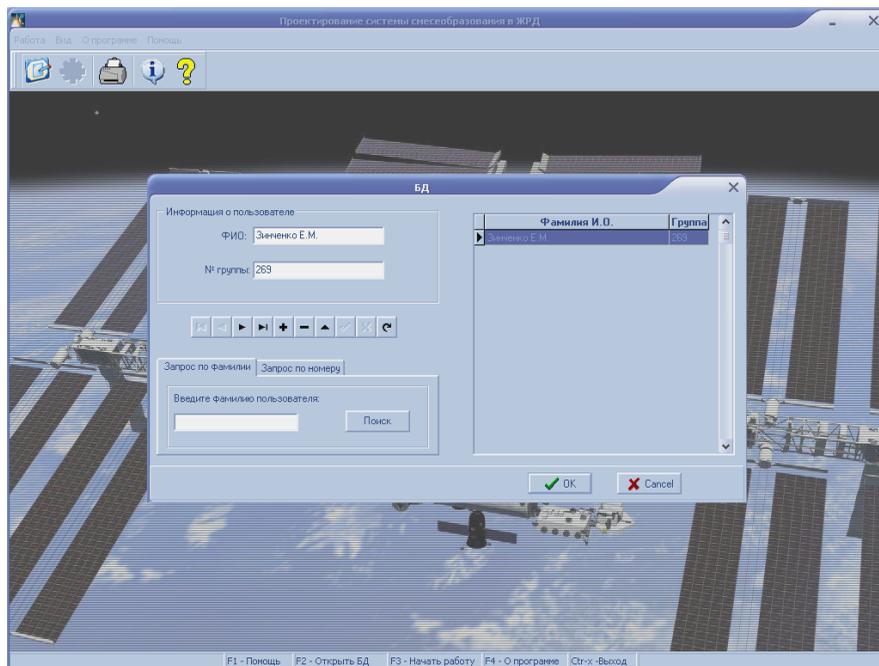


Рис. 22. Окно базы данных

### 3.1.4. Поверочный проектный расчет и параметрические исследования спроектированной форсунки в САПР

После занесения необходимых данных в базу проектов можно начинать работу с программой. Для этого нажмите F3 или кнопку



на верхней панели инструментов. Появится окно (см.рис. 23).

После выбора типа форсуночной головки необходимо нажать кнопку «Далее».

**Внимание!**

1. Если после нажатия кнопки «Далее» ничего не происходит, то следует проверить правильность ввода исходных данных. Возмож-

но, что не все данные введены или введены не в той размерности. Размерности параметров, в которых необходимо их вводить, указаны в строке ввода.

2. При вводе дробных числовых значений нужно ставить точку.

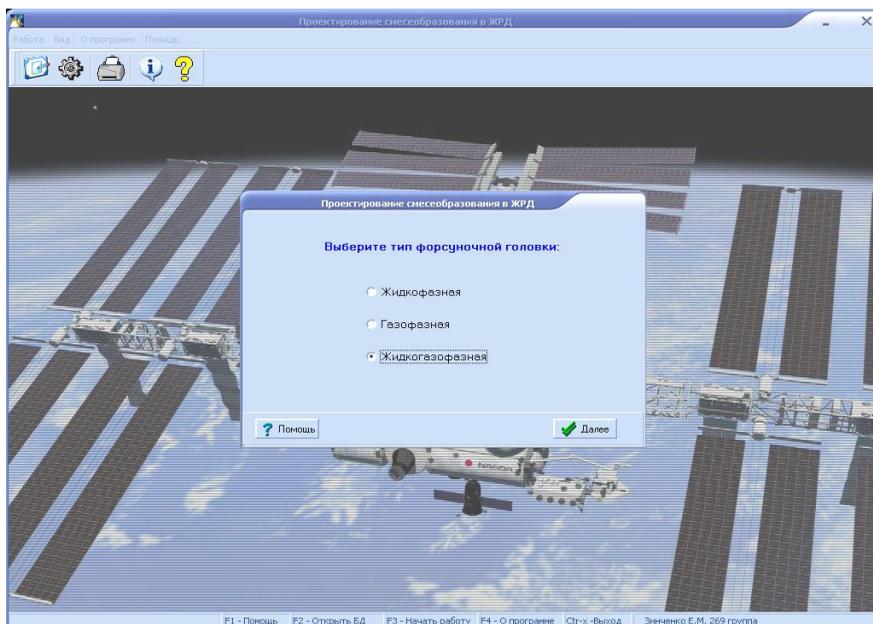


Рис. 23. Окно выбора типа форсуночной головки

Аналогичным образом выбирается и тип форсунок по количеству компонентов и по конструктивному исполнению.

В качестве примера рассмотрим проектирование однокомпонентной струйной форсунки.

Струйные форсунки, в отличие от центробежных, могут быть как газовыми (для подачи генераторного газа), так и жидкостными, поэтому сначала необходимо выбрать тип форсунки по агрегатному состоянию компонента. Методики расчета и исходные данные таких форсунок отличаются. Они были рассмотрены выше в настоящем учебном пособии к курсовому проектированию.

После выбора типа форсунки Вам необходимо ввести исходные данные для ее расчета (см. рис. 24).

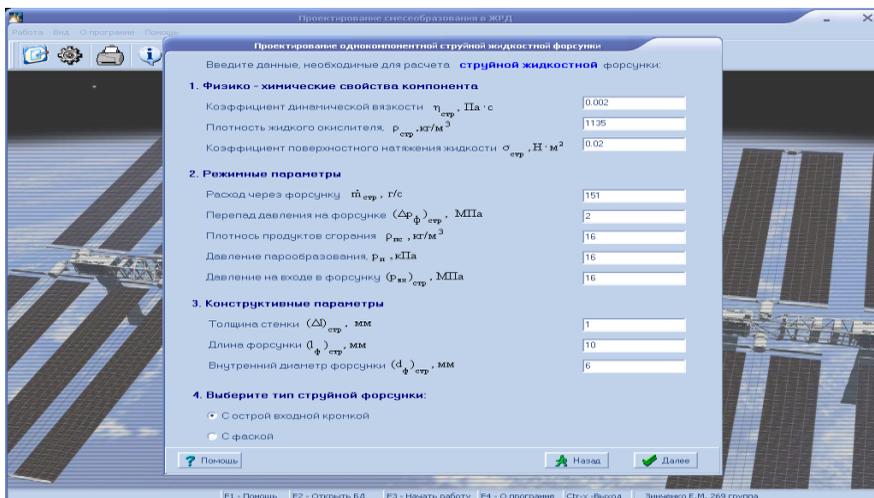


Рис. 24. Окно ввода исходных данных

Физико-химические свойства используемого компонента топлива можно взять из справочника [8], режимные параметры определяются при термодинамическом расчете камеры, а конструктивные параметры назначаются путем принятия проектных решений из рекомендуемых пределов. Варьируя конструктивными параметрами, можно получить форсунку компонента с требуемыми характеристиками.

Затем необходимо выбрать форму кромки на входе в форсунку и нажмите кнопку «Далее». Если при расчете коэффициент расхода форсунки получился больше единицы, что в принципе невозможно, то расчет прекращается, а на экране появляется сообщение об этом и о необходимости изменить введенные исходные параметры. В таком случае нужно проверить правильность ввода исходных данных или попробовать изменить их.

После нажатия кнопки «ОК» можно попытаться изменить исходные данные

Если принятые меры не помогают, то возможно следует проектировать другую форсунку, например, центробежную. В этом случае обязательно следует посоветоваться с руководителем курсового проекта.

Если все исходные данные внесены правильно, то при нажатии кнопки «Далее» Вы увидите результаты расчета проектируемой форсунки и ее схематичное изображение (см. рис. 25).

Необходимо проанализировать полученные результаты расчета, сравнив их с результатами ручного проектирования. После чего можно вывести результаты проектного расчета на печать.

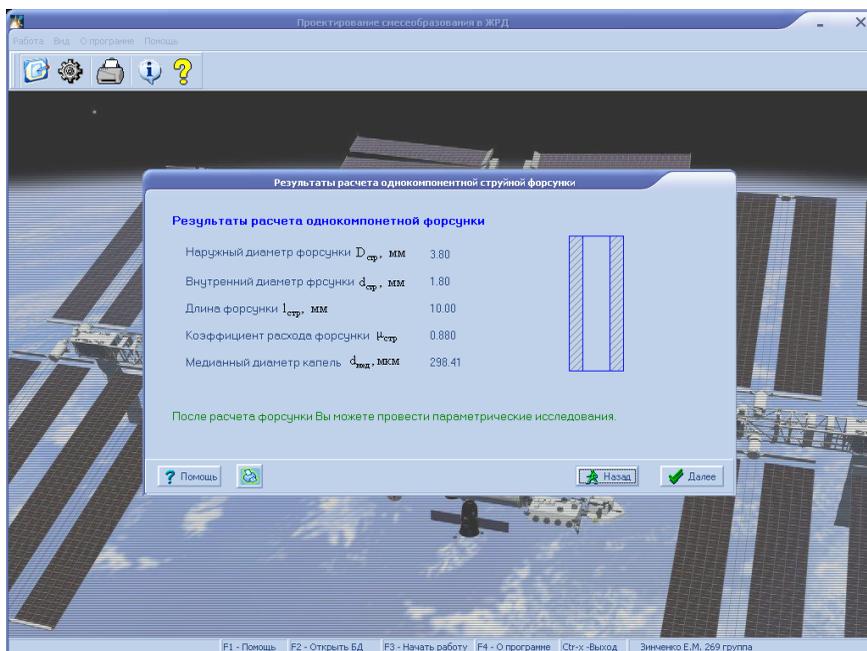


Рис. 25. Окно вывода результатов расчета

Необходимо провести параметрические исследования спроектированной форсунки или её оптимизацию по сформированной целевой функции. Параметрические исследования позволяют выявить влияние выбранных параметров на геометрические, расходные и режимные параметры форсунки.

Для перехода к параметрическим исследованиям спроектированной форсунки необходимо нажать кнопку «Далее». Откроется окно выбора числа опытов и варьируемых параметров.

Сначала нужно выбрать число опытов и один или несколько параметров, влияние которых на конструкцию, геометрические размеры и характеристики форсунки хотелось бы изучить. После чего нажимается кнопка «Далее». На экране появиться таблица (см. рис. 25).

Вначале следует выбирать один варьируемый параметр, т.к. это лучше позволит проследить его влияние на параметры и характеристики форсунки.

В первой строке находятся параметры рассчитанной Вами форсунки. В пустые ячейки следует внести выбранные значения варьируемых параметров.

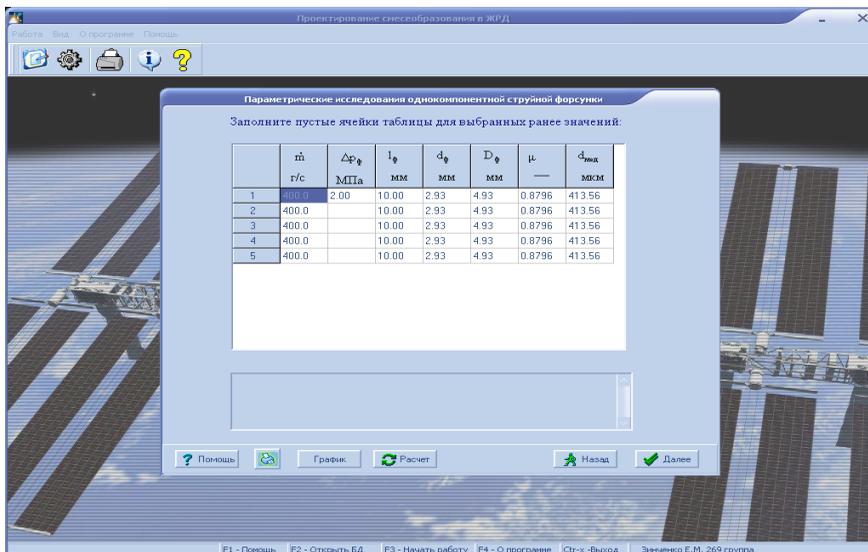


Рис. 25. Окно ввода значений варьируемых параметров

В качестве варьируемого можно выбрать любой из предлагаемых параметров, например, массовый расход через форсунку или перепад давления на ней.

После заполнения всех ячеек таблицы, нажмите кнопку «Расчет» и геометрические размеры и параметры форсунки определятся для вновь введенных исходных данных. Если в какой-либо строке коэффициент расхода форсунки по расчетам получится больше единицы,

то остальные параметры считаться не будут, а внизу экрана Вы увидите сообщение об этом.

**Внимание!** Для газовой форсунки значения медианного диаметра капель будут равны нулю.

Результаты параметрических исследований можно представить не только в табличном, но и в графическом виде (см. рис. 26). Для

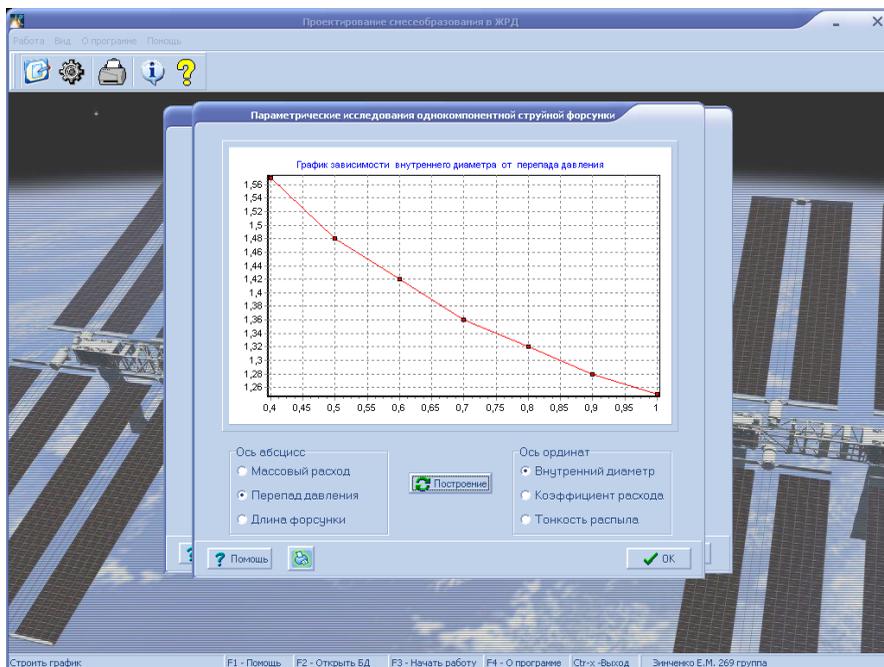


Рис. 26. Окно графического представления результатов параметрического исследования

этого нужно нажать кнопку «Графики» и выбрать, какую зависимость следует построить для анализа. Справа в окне расположены варьируемые факторы, откладываемые по оси абсцисс, слева – зависимые параметры (функции), откладываемые по оси ординат. После этого нужно нажать кнопку «Построение графиков». Таким образом, Вы можете построить и распечатать несколько графиков.

## Библиографический список

1. Алемасов, В.Е. Теория ракетных двигателей: учебник для студентов вузов / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалли, А.П. Тишин; под редакцией В.П. Глушко.– М.: Машиностроение, 1989.– 464 с.: ил.
2. Добровольский, М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования: учебник для вузов / М.В. Добровольский. 2-е изд., перераб. и доп.; под ред. Д.А. Ягодникова.– М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.– 448 с.: ил.
3. Кондрусев, В.С. Определение термодинамических характеристик процессов горения и расширения в камерах ракетных двигателей с помощью справочника «Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания»: методические указания.– Куйбышев: КуАИ, 1990.– 24 с.: ил.
4. Мелькумов, Т.М. Ракетные двигатели / Т.М. Мелькумов, Н.И. Мелик-Пашаев, П.Г. Чистяков, А.Г. Шиуков.– М.: Машиностроение, 1976. – 399 с.: ил.
5. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. /Под ред. В. М. Кудрявцева. – М.: Высшая школа, 1983. – 704 с.: ил.
6. Сточек, Н.П. Гидравлика жидкостных ракетных двигателей / Н.П. Сточек, А.С. Шапиро.– М.: Машиностроение, 1978. – 128 с.: ил.
7. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей: учебник для студентов по специальности «Авиационные двигатели и энергетические установки» / Г.Г. Гахун, В.И. Баулин, В.А. Володин и др.; Под общ. ред. Г.Г. Гахуна.– М.: Машиностроение, 1978, 1989.– 424 с.: ил.
8. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. Справочник в 10 т. / Под ред. акад. В.П. Глушко. – М.: ВИНТИ АН СССР, 1971–1979.
9. Шевелюк, М.И. Теоретические основы проектирования жидкостных ракетных двигателей / М.И. Шевелюк.– М.: Оборонгиз, 1960.
10. Штехер, М.С. Топлива и рабочие тела ракетных двигателей. / М.С. Штехер, М.: Машиностроение, 1976.– 301 с.
11. Егорычев, В.С. Топлива химических ракетных двигателей: учебное пособие / В.С. Егорычев, В.С. Кондрусев.– Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007.– 72 с. : ил.
12. Фахрутдинов, И.Х. Конструкция и проектирование ракетных двигателей твердого топлива: учебник для машиностроительных вузов / И.Х. Фахрутдинов, А.В. Котельников.– М.: Машиностроение, 1987.–328 с.: ил.
13. Проектирование форсунок системы смесеобразования ЖРД: метод. указания к курсовому проектированию /сост. В.С. Кондрусев, В.Е. Годлевский, Л.Я. Шумихина.– Самара: САИ, 1992.– 52 с.: ил.
14. Распыление жидкостей / Ю.Ф. Дитякин, Л.Я. Клячко, Б.В. Новиков, В.И. Ягодкин.– М.: Машиностроение, 1977.– 207 с.: ил.
15. Егорычев, В.С. Проектный расчет двухкомпонентной центробежной эмульсионной форсунки / В.С. Егорычев // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Материалы докладов междунар. науч.-техн. конф. 24-26 июня 2009г.–В 2 ч. Ч.1.– с. 151...152.– Самара: СГАУ, 2009.– 266 с.: ил.

Учебное издание

*Егорычев Виталий Сергеевич*

**РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ  
СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ В ЖРД**

*Учебное пособие*

Редакторская обработка  
Доверстка

Подписано в печать . Формат 60×84 1/16  
Бумага оцветная. Печать оцветная.  
Печ. л. 6,5 .  
Тираж 150 экз. Заказ . ИП- /2008

Самарский государственный  
аэрокосмический университет  
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

---

Изд-во Самарского государственного  
аэрокосмического университета.  
443086, Самара, Московское шоссе, 34.