

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический  
университет»

Кафедра «Ракетные двигатели»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине  
«Конструирование камер жидкостных ракетных двигателей»  
для студентов специальности 160700.65, 24.05.02  
«Проектирование авиационных и ракетных двигателей» очной  
формы обучения

Воронеж 2015

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

УДК 621.454

Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Конструирование камер жидкостных ракетных двигателей» специальности 160700.65, 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» очной формы обучения / ФГБОУ ВПО "Воронежский государственный технический университет"; сост. Г.И. Скоморохов, А.А. Гуртовой. Воронеж, 2015. 53 с.

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

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

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

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

© ФГБОУ ВПО "Воронежский государственный технический университет", 2015

## ГИДРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ 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). Причём, используя накопленный опыт их проектирования, можно указать допустимые пределы их изменения.

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.

### 1. Однокомпонентная струйная жидкостная форсунка

Проектный гидравлический расчёт однокомпонентной струйной жидкостной форсунки, расчётная 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  $0,2 \text{ мм} \leq d_c \leq D_\phi$

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.

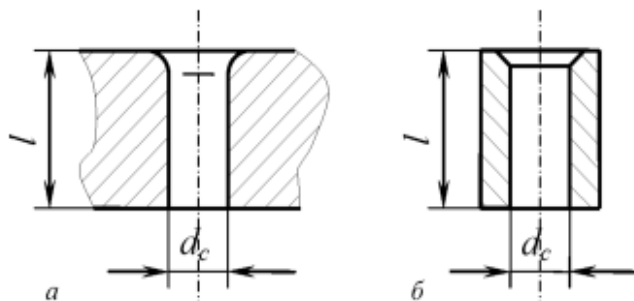


Рис. 13. Расчётная схема струйных форсунок:  
*a* - отверстие в огневом дне смесительной головки; *б* - трубка

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

Если форсунка подаёт 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.

Если же форсунка подаёт 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.

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

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

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

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:

- безотрывной режим истечения, когда струя компонента заполняет всё выходное сечение форсунки;
- отрывной 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

$$K \leq K_{кр}, \quad (18)$$

где  $K$  - число кавитации,  $K_{кр}$  - критическое число кавитации, величина которого зависит от относительной длины 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-

является 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

при  $p_k = \text{const}$  и  $\frac{l}{d_c} = \text{const}$  можно также округлением вх одной

кромки. Чем больше радиус округления вх одной кромки и чем длиннее канал при постоянном диаметре сопла, тем больше

При большом радиусе округления 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 с острой вх одной кромкой, имеющих  $\frac{l}{d_c} < 1,5$ , является неблагоприятным для двигателя из-за значительного колебания коэффициента расхода.

Кавитационный режим истечения у форсунок с острой вх одной кромкой при  $\frac{l}{d_c} > 1,5$  является тоже нежелательным, т.к. вызывает неустойчивость рабочего процесса двигателя. Поэтому и от кавитационных режимов 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.

1.9.1. Коэффициент линейного гидравлического сопротивления форсунки  $\lambda$

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

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

переходном и турбулентном - эмпирической зависимостью Блазиуса

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

турбулентном течении компонента, когда  $Re > 10000$ ,

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; переходом 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

$$\mu = \varepsilon \sqrt{1 + \kappa} = \varepsilon \sqrt{1 + \frac{P_k - P_n}{\Delta p_\phi}}, \quad (27)$$

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

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

В первой итерации перепад давления на форсунке  $\Delta p_\phi$  берётся равным принятому ранее в разделе 3.3.1. первой курсовой работы «Термодинамический расчёт и проектирование камер ЖРД».

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. 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

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

#### 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 ведётся оптимизация струйной жидкостной форсунки.

2.1.13. Вычерчивается спроектированная струйная жидкостная форсунка по полученным геометрически размерам в масштабе 10:1.

## 2.2. Однокомпонентная струйная газовая форсунка

Расчётная схема однокомпонентной струйной газовой форсунки приведена на рис. 13. Проектный газодинамический расчёт 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 подаёт компонент из полости смесительной головки, расположенной между средним и наружным днищами, то 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].

Если же форсунка подаёт компонент из полости смесительной головки, расположенной между средним и огневым днищами, то при определении её длины следует учитывать толщину только 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 газовой форсунки на входе может быть острой, закруглённой по радиусу или с фаской. Форсунки с острой входной кромкой в смесительных головках ЖРД используются очень редко, чаще используются форсунки с фаской.

2.2.4. Находится относительная длина форсунки или величина отношения  $l/d_c$ .

Отношение  $l/d_c$  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.

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 расчёт форсунки повторяется при новом значении диаметра. Расчёт прекращается, если значения диаметров в последней и предыдущей итерациях отличаются не более, чем на 0,5 %.

2.2.13. Вычерчивается спроектированная струйная газовая форсунка по полученным геометрически размерам в масштабе 10:1.

### 2.3. Однокомпонентная центробежная жидкостная форсунка

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

Проектный расчёт её проводится в следующей последовательности:

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

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

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

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

2.3.3. Задаются диаметром каждого тангенциального отверстия  $d_{вх}$ .

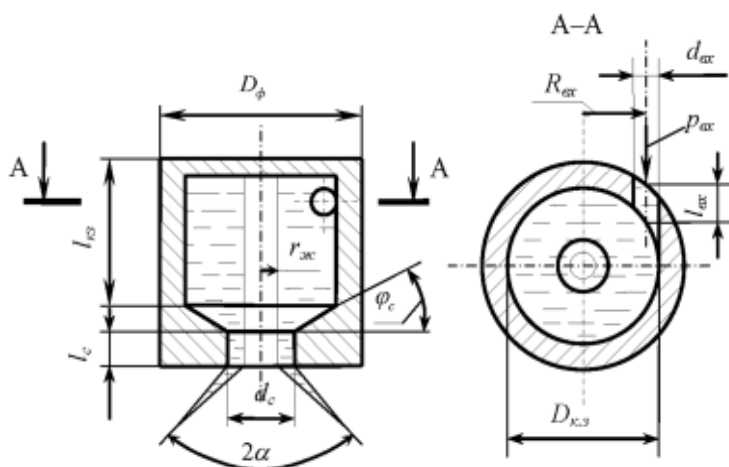


Рис. 14. Расчётная схема и геометрические размеры однокомпонентной центробежной форсунки

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

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

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

Длина входных отверстий в первом приближении может быть принята  $l_{\text{кз}} = 1,2 \delta_{\text{ст}}$ .

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 подаёт 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 подаёт 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,

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

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 отношения должно быть  $R_{вх}/r_c = 1 \dots 25$ , 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

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

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

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

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

Для шнековой форсунки имеем

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

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

2.3.11. Число Рейнольдса на входе в форсунку

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

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

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

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

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

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

2.3.14. Коэффициент живого сечения сопла форсунки

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

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 расчётов 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 погрешный 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.

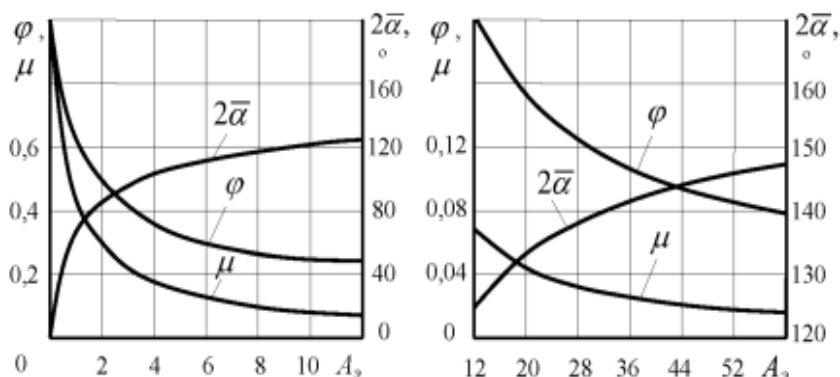


Рис. 15. Зависимость коэффициентов расхода  $\mu$ , живого сечения  $\varphi$  и среднего угла факела распыла  $2\bar{\alpha}$  от эквивалентной геометрической характеристики центробежной форсунки  $A_s$

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 расчёт 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  $r_{ax}$  и их число  $i_{ax}$ . 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 придётся изменить и принятый ранее тип форсуночной головки.

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

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

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

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

2.3.20. Площадь живого сечения сопла форсунки

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

2.3.21. Среднее значение осевой скорости на выходе из форсунки

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

2.3.22. Среднее значение абсолютной скорости на выходе из форсунки

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

2.3.23. Толщина пленки на выходе из форсунки

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

2.3.24. Критерий Вебера

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

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.

2.3.25. Критерий Лагласа

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

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 уточнённый проектный расчёт 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 смещением**

Расчётная схема двухкомпонентной центробежно-центробежной жидкостной форсунки с внешним смещением представлена на рис.16.

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

Проектный расчёт такой двухкомпонентной форсунки проводится в следующей последовательности.

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

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

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

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 горячего.

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

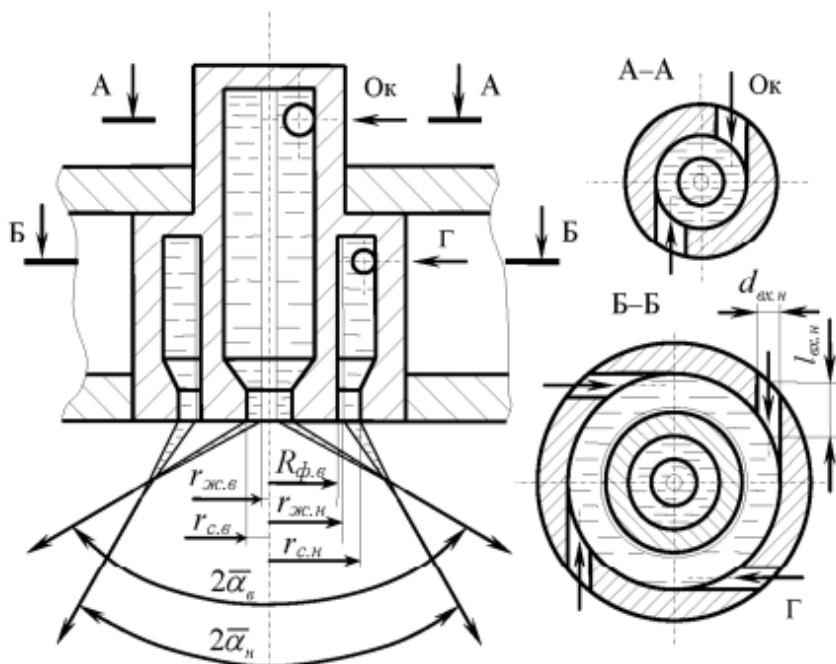


Рис. 16. Расчетная схема двухкомпонентной центробежно-центростремительной жидкостной форсунки с внешним смешением

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

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

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 не распадаясь растекались и закручивались по стенке камеры закручивания форсунки (см. рис. 16).

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

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

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

2.4.1.5. Длина камеры закручивания

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

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

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

Форсунка подаёт 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,

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

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  $R_{\text{ос.н}}/r_{\text{с.н}}$  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

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

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

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

2.4.1.11. Число Рейнольдса на входе в форсунку

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

где  $\eta_r$  – 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,

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

2.4.1.14. Коэффициент живого сечения сопла форсунки

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

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 расчётов 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,

$$\Delta p_{\phi_r} = \frac{\dot{m}_{\phi_r}^2}{2 \rho_r \mu^2 F_{\phi_n}^2}, \quad (67)$$

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

Полученный перепад давления на форсунке  $\Delta p_{\phi_r}$  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 расчёт 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  $d_{вх.n}$  и их число  $i_{вх.n}$ . 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  $D_r$ . Может быть придётся 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.

$$\Delta p_{\phi_{окл}} = \Delta p_{\phi_{оклр}}, \quad \Delta p_{\phi_{г.л}} = \Delta p_{\phi_{г.лр}} \quad (68)$$

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

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

2.4.1.20. Площадь живого сечения сопла форсунки

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

2.4.1.21. Среднее значение осевой скорости горючего на выходе из форсунки

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

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

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

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

$$d_m = 269 L_p^{-0,35} \left( \frac{We \rho_{\text{к}}}{\rho_{\text{жс}}} \right)^{-0,483} \quad [\text{мкм}]. \quad (76)$$

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 расчёт внутреннего контура двухкомпонентной форсунки

Внутренний контур двухкомпонентной центробежно-центробежной жидкостной форсунки с внешним смещением представляет собой однокомпонентную центробежную жидкостную форсунку окислителя

При проектировании этого внутреннего контура 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

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

где  $D_{\phi, в}$  – 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

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

где  $d_{вх.н} = 2r_{вх.н}$  – 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  $D_{с.в} = d_{с.в} + \Delta_{см.с.в}$  и диаметром воздушного вихря наружного контура форсунки  $d_{ж.н}$ . Это запишется

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

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.

В итоге вычерчивается спроектированная двухкомпонентная центробежно-центробежная жидкостная форсунка с внешним смешением по полученным геометрическим 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.

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

Расчётная 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 учётом работы внутреннего контура.

Наружный контур двухкомпонентной центробежно-центробежной жидкостной форсунки с внутренним смешением представляет собой однокомпонентную центробежную жидкостную форсунку горючего, в камеру закручивания которой со стороны газового вих-

ря подаётся 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.

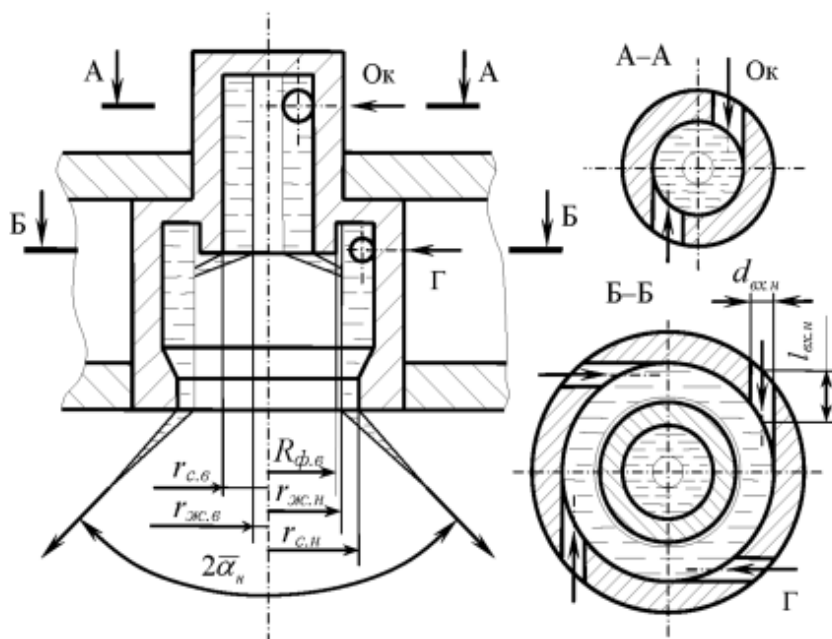


Рис. 17. Расчётная схема двухкомпонентной центробежно-центробежной жидкостной форсунки с внутренним смешением

Проектный расчёт 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 внутрен-

ним смещением необходимо для проектного расчёта внутреннего контура, представляющего собой однокомпонентную центробежную жидкостную форсунку окислителя.

Последовательность начального проектного расчёта 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  $D_{\phi}$ , вычисленному в разделе 1.3.1.2,

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

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 расчётную 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. Струи горючего не распались, а свободно закручивались и растекались по стенке камеры закручивания форсунки.

2.5.1.4. На поперечном разрезе нужного сечения чертежа форсунки, выполненного в масштабе 10:1, замеряется длина входного

тангенциального отверстия  $l_{\text{ex},n}$  (см. рис. 17) и определяют отношение  $l_{\text{ex},n}/d_{\text{ex},n}$ . Оно должно быть в интервале  $l_{\text{ex},n}/d_{\text{ex},n} = 1,5 \dots 6,0$ .

Если полученное значение  $l_{\text{ex},n}/d_{\text{ex},n}$  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  $l_{\text{ex}} = \delta_{\text{ст}}$ .

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  $\bar{l}_{\text{к.з.н}} = 0,5 \dots 3,0$  [2; 7].

При определении длины камеры закручивания форсунки горючего, которая подаёт 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 расчёт внутреннего контура двухкомпонентной эмульсионной форсунки*

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

При проектировании внутреннего контура двухкомпонентной центробежно-центробежной жидкостной форсунки с внутренним смещением 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

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

где  $D_{\text{ф.в}}$  – 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

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

где  $d_{\text{эс.н}} = 2r_{\text{эс.н}}$  – диаметр вихря жидкости или воздушного вихря,  $\Delta_{\text{в.н}}$  – 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  $\Delta_{\text{в.н}} = 0,05 \dots 0,5$  мм.

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

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

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

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

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

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

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

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 объёмов компонентов, составляющих смесь,

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

После соответствующих преобразований получаем

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

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  $d_{\text{с.н}}/D_{\text{к.з.н}} = 0,2 \dots 1,0$  [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  $l_c = 0,2 \dots 1,0$ .

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  $\eta_{\text{э}}$

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

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

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

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

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,

$$\lg \lambda = \frac{25,8}{(\lg \text{Re}_{\text{вх.н}})^{2,58}} - 2. \quad (91)$$

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

$$A_{э.в} = \frac{\left( K_m \frac{R_{э.в}}{R_{э.н}} \sin \theta_{э.в} + \sqrt{e} \sin \theta_{э.н} \right) \sqrt{e}}{(1 + K_m)(K_m + e)} \frac{R_{э.н} r_{с.н}}{i_{э.н} r_{э.н}^2}, \quad (92)$$

где  $\theta_{э.в}$  и  $\theta_{э.н}$  – 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,

$$A_{э.э} = \frac{A_{э.в}}{1 + \frac{\lambda}{2} A_{э.в} \left( \frac{(R_{э.н} + r_{э.н})^2 + r_{э.н}^2}{r_{с.н}^2} - 1 \right)}, \quad (93)$$

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

2.5.3.14. Коэффициент живого сечения сопла форсунки

$$\varphi_3 = 1 - \frac{r_{э.н}^2}{r_{с.н}^2} = \frac{1}{\left( \sqrt[3]{\frac{A_{э.э}}{2\sqrt{2}} + \sqrt{\frac{A_{э.э}^2}{8} - \frac{1}{27}}} + \sqrt[3]{\frac{A_{э.э}}{2\sqrt{2}} - \sqrt{\frac{A_{э.э}^2}{8} - \frac{1}{27}}} \right)^2}. \quad (94)$$

2.5.3.15. Коэффициент расхода эмульсионной форсунки

$$\mu_3 = \varphi_3 \sqrt{\frac{\varphi_3}{2 - \varphi_3}}. \quad (95)$$

2.5.3.16. Средний угол факела распыла

$$\operatorname{tg} \bar{\alpha}_3 = \frac{2\mu_3 A_{3,3M}}{\sqrt{(1 + \sqrt{1 - \varphi_3})^2 - 4\mu_3^2 A_{3,3M}^2}}. \quad (96)$$

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,

$$F_{\phi,н} = \frac{\pi d_{с,н}^2}{4} = \frac{\dot{m}_{\phi}}{\mu_3 \sqrt{2\rho_3 \Delta p_{\phi,г}}}, \quad (97)$$

$$d_{с,н} = \sqrt{\frac{4F_{\phi,э,н}}{\pi}}. \quad (98)$$

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

$$r_{ж,н} = r_{с,н} \sqrt{1 - \varphi_3}. \quad (99)$$

2.5.3.19. Площадь живого сечения сопла форсунки

$$F_{ж,н} = \varphi_3 F_{с,н}. \quad (100)$$

2.5.3.20. Среднее значение осевой скорости эмульсии на выходе из форсунки

$$W_{а,э} = \frac{\dot{m}_{\phi}}{\rho_3 F_{ж,н}}. \quad (101)$$

2.5.3.21. Среднее значение абсолютной скорости эмульсии на выходе из форсунки

$$W_3 = \frac{W_{а,э}}{\cos \bar{\alpha}_3}. \quad (102)$$

2.5.3.22. Толщина пелены эмульсии на выходе из форсунки

$$\delta_{п,э} = r_{с,н} - r_{ж,н}. \quad (103)$$

2.5.3.23. Критерий Вебера

$$We = \frac{\rho_3 W_3^2 d_{с,н}}{\sigma_3}, \quad (104)$$

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

$$L_p = \frac{\rho_a \delta_n \sigma_a}{\eta_3}, \quad (105)$$

где  $\eta_3$  – динамическая вязкость впрыскиваемой эмульсии.

2.5.3.25. Медианный диаметр образовавшихся капель в факеле распыла форсунки

$$d_m = 269 L_p^{-0,35} \left( \frac{We \rho_k}{\rho_3} \right)^{-0,483}. \quad (106)$$

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.

2.5.3.26. Вычерчивается спроектированная двухкомпонентная центробежно-центробежная жидкостная форсунка с внутренним смешением по полученным геометрически размерам в масштабе 10:1.

Иногда проводят уточненный проектный расчет форсунки, учитывая её конструктивные особенности, если имеются результаты экспериментальных исследования форсунок, аналогичной конструкции.

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

Расчётная 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.

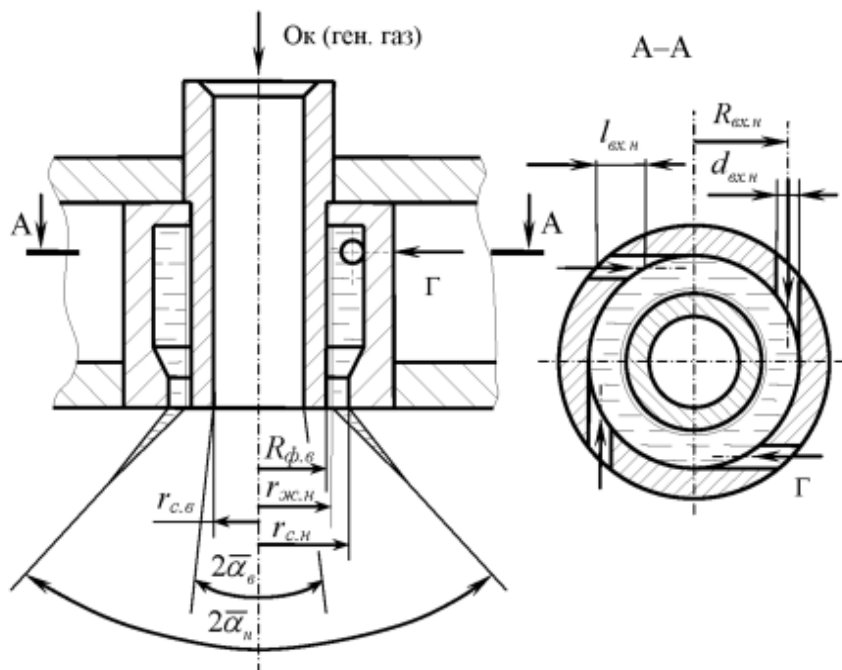


Рис. 18. Расчётная схема двухкомпонентной струйно-центробежной газожидкостной форсунки с внешним смешением

Проектный расчёт такой форсунки начинается с внутреннего контура и проводится следующим образом.

### 2.6.1. Проектный расчёт внутреннего контура двухкомпонентной газожидкостной форсунки

Внутренний контур двухкомпонентной струйно-центробежной газожидкостной форсунки с внешним смешением представляет со-

бой однокомпонентную струйную газовую форсунку окислителя (генераторного газа окислительного газогенератора).

Проектный расчёт такой форсунки проводится в следующей последовательности.

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

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

В первой итерации его можно принять равным  $4 \dots 6 \text{ мм}$ .

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

Газовая струйная форсунка подаёт 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  $2,0 \dots 3,0 \text{ мм}$ , а расстояние между днищами составляет  $8 \dots 12 \text{ мм}$ .

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  $l_{c.с}/d_{c.с}$

2.6.1.5. Площадь сопла форсунки на выходе

$$F_{\phi.с} = \frac{\pi d_{c.с}^2}{4}. \quad (107)$$

2.6.1.6. Число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{4\dot{m}_{\phi.г}}{\pi \eta_{г} d_{c.с}}, \quad (108)$$

где  $\dot{m}_{\text{фгг}}$  - массовый расход генераторного газа через одну форсунку,  $\eta_{\text{гг}}$  - динамическая вязкость генераторного газа.

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

2.6.1.7. Среднее значение скорости генераторного газа на выходе из форсунки

$$W_{\text{гг}} = \frac{\dot{m}_{\text{фгг}}}{\rho_{\text{гг}} F_{\text{фс}}}, \quad (109)$$

где  $\rho_{\text{гг}}$  - плотность генераторного газа на входе в форсунку.

2.6.1.8. Коэффициент расхода форсунки

$$\mu = \left( 1,23 + \frac{58 l_{\text{св}}}{\text{Re} d_{\text{св}}} \mu \right)^{-1} \quad \text{или} \quad (110)$$

$$\mu = \frac{\sqrt{1,23^2 + 232 l_{\text{св}} / \text{Re} d_{\text{св}}} - 1,23}{116 l_{\text{св}} / \text{Re} d_{\text{св}}}. \quad (111)$$

2.6.1.9. Давление генераторного газа на входе в форсунку

$$P_{\text{вх.гг}} = P_{\text{к}} + \Delta P_{\text{фс}}, \quad (112)$$

где  $P_{\text{к}}$  - давление на входе в камеру сгорания,  $\Delta P_{\text{фс}}$  - перепад давления на внутреннем контуре двухкомпонентной форсунки или струйной газовой форсунке.

2.6.1.10. Плотность генераторного газа на входе в форсунку

$$\rho_{\text{гг}} = \frac{P_{\text{вх.гг}}}{R_{\text{гг}} T_{\text{вх.гг}}}, \quad (113)$$

где  $T_{\text{вх.гг}}$  - температура генераторного газа на входе в форсунку.

2.6.1.11. Площадь сопла форсунки на выходе

$$F_{\phi \sigma} = \frac{\dot{m}_{\phi \Gamma}}{\mu \rho_{\Gamma} \left( \frac{P_{\kappa}}{P_{\text{ex} \Gamma}} \right)^{\frac{1}{n}} \sqrt{2 \frac{n}{n-1} R_{\Gamma} T_{\text{ex} \Gamma} \left[ 1 - \left( \frac{P_{\kappa}}{P_{\text{ex} \Gamma}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]}}. \quad (114)$$

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

$$d_{c, \sigma} = \sqrt{\frac{4 F_{\phi, \sigma}}{\pi}}. \quad (115)$$

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

При отличии значений диаметров менее 3% расчёт прекращается.

2.6.1.13. Наружный диаметр газовой форсунки окислителя, являющейся внутренним контуром двухкомпонентной струйно-центробежной газожидкостной форсунки с внешним смешением

$D_{\phi \sigma}$  (см. рис.18).

$$D_{\phi \sigma} = d_{c, \sigma} + 2\delta_{\text{ст. вн}}, \quad (116)$$

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

Нежелательно иметь толщину стенки менее 0,5 мм

### 2.6.2. Проектный расчёт наружного контура двухкомпонентной газожидкостной форсунки

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

2.6.2.1. Задаются числом входных тангенциальных отверстий

$i_{\text{вх} n}$

Число входных тангенциальных отверстий может быть в пределах  $i_{вх.н} = 2 \dots 6$  [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  $d_{вх.н}$

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.

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

$$D_{к.з.н} \geq D_{ф.в} + 2d_{вх.н}, \quad (117)$$

где  $d_{вх.н}$  – 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  $l_{вх.н}$  (см. рис. 18).

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

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

2.6.2.6. Длина камеры закручивания

$$l_{к.з.н} = \bar{l}_{к.з.н} \cdot D_{к.з.н}, \quad (118)$$

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

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

Центробежная форсунка, являясь наружным контуром двухкомпонентной струйно-центробежной газожидкостной форсунки, подаёт жидкое горючее из полости смесительной головки, расположенной 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 переход от камеры закручивания к соплу  $\varphi_c$

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

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

$$R_{вх.н} = R_{к.з.н} - r_{вх.н}. \quad (119)$$

2.6.2.9. 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 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  $R_{вх.н}/r_{с.н}$  должно быть в пределах 1...25, а отношение  $d_{с.н}/D_{к.з.н} = 0,2 \dots 1,0$ .

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

$$l_{с.н} = \bar{l}_{с.н} d_{с.н}. \quad (120)$$

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

2.6.2.11. Геометрическая характеристика центробежной форсунки горячего

$$A = \frac{R_{вс.н} r_{с.н}}{i_{вс.н} r_{вс.н}^2}, \quad (121)$$

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

$$A = \frac{R_{вс.н} r_{с.н}}{i_{вс.н} r_{вс.н}^2} \sin \theta, \quad (122)$$

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

2.6.2.12. Число Рейнольдса на входе в форсунку

$$Re_{вх} = \frac{4\dot{m}_{ф.г}}{\pi \eta_r d_{вс.н} \sqrt{i_{вс.н}}}, \quad (123)$$

где  $\eta_r$  – динамическая вязкость горячего, подаваемого через форсунку.

2.6.2.13. Коэффициент трения при условии на входе в форсунку

$\lambda$  определяется с помощью эмпирической зависимости

$$\lg \lambda = \frac{25,8}{(\lg Re_{вх})^{2,58}} - 2. \quad (124)$$

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

$$A_3 = \frac{A}{1 + \frac{\lambda}{2} R_{вс.н} (R_{вс.н} + d_{вс.н} - r_{с.н})}, \quad (125)$$

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

2.6.2.15. Коэффициент живого сечения сопла форсунки

$$\varphi = 1 - \frac{r_{ж.н}^2}{r_{с.н}^2} = \frac{1}{\left( \sqrt[3]{\frac{A_3}{2\sqrt{2}} + \sqrt{\frac{A_3^2}{8} - \frac{1}{27}}} + \sqrt[3]{\frac{A_3}{2\sqrt{2}} - \sqrt{\frac{A_3^2}{8} - \frac{1}{27}}} \right)^2}. \quad (126)$$

2.6.2.16. Коэффициент расхода центробежной форсунки горючего

$$\mu = \varphi \sqrt{\frac{\varphi}{2 - \varphi}}. \quad (127)$$

2.6.2.17. Средний угол факела распыла

$$\operatorname{tg} \bar{\alpha} = \frac{2\mu A_3}{\sqrt{(1 + \sqrt{1 - \varphi})^2 - 4\mu^2 A_3^2}}. \quad (128)$$

Для контроля правильности расчётов 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

$$F_{\phi.н} = \frac{\pi d_{с.н}^2}{4}. \quad (129)$$

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

$$\Delta p_{\phi.г} = \frac{\dot{m}_{\phi.г}^2}{2\rho_r \mu^2 F_{\phi.н}^2}, \quad (130)$$

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

Полученный перепад давления на форсунке  $\Delta p_{\phi.г}$  не должен выходить за пределы рекомендованного интервала

изменить  $d_{с.н}$ , принятый в первом приближении. Более точное значение  $d_{с.н}$  для следующей итерации можно получить, используя уравнение (45), записанное в явном виде относительно площади сопла форсунки  $F_{ф.н}$ . Можно изменить геометрические размеры форсунок, назначенные в первом приближении. Прежде следует изменить 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

$$\Delta p_{\phi.ок.я} = \Delta p_{\phi.ок.нр}, \quad \Delta p_{\phi.т.я} = \Delta p_{\phi.т.нр}. \quad (131)$$

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

$$r_{ж.н} = r_{с.н} \sqrt{1 - \phi}. \quad (132)$$

2.6.2.21. Площадь живого сечения сопла форсунки

$$F_{ж.н} = \phi F_{с.н}. \quad (133)$$

2.6.2.22. Среднее значение осевой скорости горючего на выходе из форсунки

$$W_a = \frac{\dot{m}_{\phi.т}}{\rho_{т} F_{ж.н}}. \quad (134)$$

2.6.2.23. Среднее значение абсолютной скорости горючего на выходе из форсунки

$$W = \frac{W_a}{\cos \bar{\alpha}}. \quad (135)$$

2.6.2.24. Толщина пелены горючего на выходе из форсунки

$$\delta_n = r_{с.н} - r_{ж.н}. \quad (136)$$

2.4.1.25. Критерий Вебера

$$We = \frac{\rho_k W^2 d_{c.n}}{\sigma_r}, \quad (137)$$

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

2.6.2.26. Критерий Лапласа

$$L_p = \frac{\rho_{ex} \delta_n \sigma_r}{\eta_r}, \quad (138)$$

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

2.6.2.27. Медианный диаметр образовавшихся капель в факеле распыла форсунки

$$d_m = 269 L_p^{-0,35} \left( \frac{We \rho_k}{\rho_{ex}} \right)^{-0,483}. \quad (139)$$

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 или 5:1.

## 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".

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

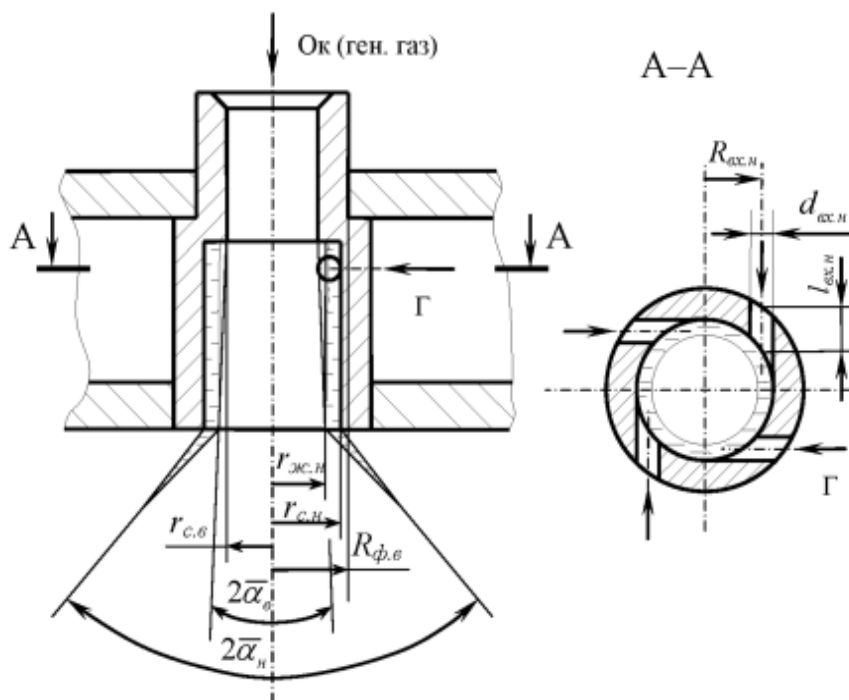


Рис. 19. Расчётная схема двухкомпонентной струйно-центробежной газожидкостной форсунки с внутренним смешением

Форсунка состоит из наружного и внутреннего контуров. Внут-

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

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 центробежная жидкостная форсунка 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 внутренним смещением по полученным геометрически размерам в масштабе 10:1 или 5:1.

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

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

$$d_{с.г} \leq D_{к.з.н} - 2d_{вх.н}, \quad (140)$$

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 струйно-центробежной газожидкостной форсунки должна полностью располагаться внутри воздушного вихря наружного контура этой форсунки. Для этого нужно иметь

$$d_{с.г} = d_{вх.н} - 2 \frac{l_{к.з.н}}{\cos \bar{\alpha}_g}, \quad (141)$$

где  $d_{вх.н} = 2r_{вх.н}$  – диаметр воздушного вихря или вихря жидкости центробежной форсунки горючего;  $l_{к.з.н}$  – длина камеры закручивания наружного контура двухкомпонентной фор-

сунки;  $\bar{\alpha}_g$  – угол распыла струйной газовой форсунки.

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

## 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 на самовоспламеняющихся компонентах топлива. Схема организации рабочего процесса в КС таких двигателей «газ– газ».

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

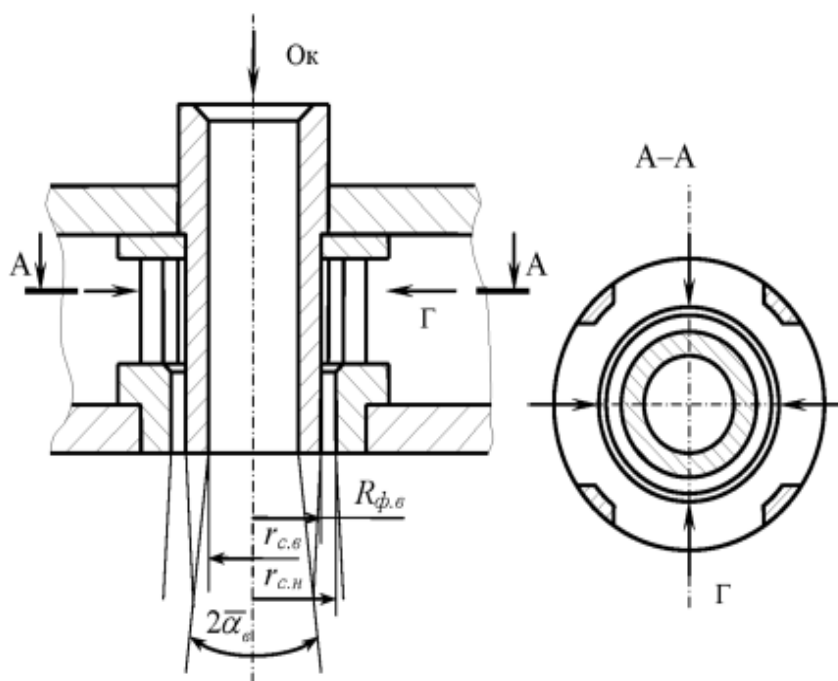


Рис. 20. Расчётная схема двухкомпонентной струйно-струйной газовой форсунки с внешним смешением

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 расчёт 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 расчёта кольцевой струйной форсунки состоит в том, что используется понятие эквивалентного диаметра  $d_{\text{э.н}}$ .

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

Выполняются последовательно разделы 2.6.1.1...2.6.1.11 настоящего учебного пособия, которые приобретают нумерацию 2.8.1.1...2.8.1.11. Далее определяются:

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

$$d_{\text{э.н}} = \sqrt{\frac{4F_{\text{ф.э.н}}}{\pi}}. \quad (142)$$

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

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

$$d_{с.н} = \sqrt{\frac{4F_{ф.э.н}}{\pi} + D_{ф.в}^2}. \quad (143)$$

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

$$D_{ф.н} = d_{с.н} + 2\delta_{ст.н}. \quad (144)$$

2.8.3. Чертится спроектированная двухкомпонентная струйно-струйная газовая форсунка с внешним смешением по полученным геометрически размерам в масштабе 10:1 или 5:1.

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



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

окислительного генераторного газа. Наружный контур - однокомпонентную струйную газовую форсунку, или форсунки горючего (восстановительного генераторного газа). Оба контура рассчитываются независимо друг от друга.

Проектный расчёт 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

$$F_{\phi} = F_{\phi в} + F_{\phi н} = \frac{\dot{m}_{\phi в ГГ}}{\mu \rho_{\text{ок ГГ}} \left( \frac{P_{\kappa}}{P_{\text{ок ГГ}}} \right)^{\frac{1}{n}} \sqrt{2 \frac{n}{n-1} R_{\text{ГГ}} T_{\text{ок ГГ}} \left[ 1 - \left( \frac{P_{\kappa}}{P_{\text{ок ГГ}}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]}} + \frac{\dot{m}_{\phi н ГГ}}{\mu \rho_{\text{ок ГГ}} \left( \frac{P_{\kappa}}{P_{\text{ок ГГ}}} \right)^{\frac{1}{n}} \sqrt{2 \frac{n}{n-1} R_{\text{ГГ}} T_{\text{ок ГГ}} \left[ 1 - \left( \frac{P_{\kappa}}{P_{\text{ок ГГ}}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]}} , \quad (145)$$

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

$$d_{с. \phi} = \sqrt{\frac{4 F_{\phi}}{\pi}} . \quad (146)$$

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

$$\dot{m}_{\phi, \text{н.г.г}} = \frac{\dot{m}_{\phi, \text{н.г.г}}}{n_{\phi}}, \quad (147)$$

где  $\dot{m}_{\phi, \text{н.г.г}}$  - 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

$$\Delta p_{\phi, \text{ок.я}} = \Delta p_{\phi, \text{ок.нр}}, \quad \Delta p_{\phi, \text{т.я}} = \Delta p_{\phi, \text{т.нр}}. \quad (148)$$

## 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".

Расчётная 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.

ки. Из сопла форсунки вытекает газожидкостная струя топливной смеси.

Оба контура такой форсунки рассчитываются независимо друг от друга, причём расчёт начинается с внутреннего контура.

Проектный расчёт такой двухкомпонентной струйно-струйной газожидкостной форсунки с внутренним смешением 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 2.1.1.2.1.1 - 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

$$\dot{m}_{\phi_{жг}} = \frac{\dot{m}_{\phi_{жг}}}{n_{\phi_{г}}}, \quad (149)$$

где  $\dot{m}_{\phi_{жг}}$  - массовый расход горючего через наружный контур двухкомпонентной форсунки.

2.10.3. Определяется площадь сопла двухкомпонентной форсунки на выходе

$$F_{\phi} = F_{\phi_{жг}} + F_{\phi_{г}} = \frac{\dot{m}_{\phi_{жг}}}{\mu \rho_{\text{экст}} \left( \frac{P_{к}}{P_{\text{экст}}} \right)^{\frac{1}{n}} \sqrt{2 \frac{n}{n-1} R_{гг} T_{\text{экст}} \left[ 1 - \left( \frac{P_{к}}{P_{\text{экст}}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]}} + \frac{\dot{m}_{\phi_{гг}}}{\rho_{г} W_{г}}, \quad (150)$$

где  $\dot{m}_{\phi,лг}$  - массовый расход окислительного генераторного газа через внутренний контур двухкомпонентной струйно-струйной газожидкостной форсунки;  $\dot{m}_{\phi,лг}$  - массовый расход жидкого горючего через наружный контур двухкомпонентной форсунки,  $\rho_{г}$  - 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:

$$\rho_{г} = \frac{P_{к}}{R_{г} T_{ок\phi,лг}}. \quad (151)$$

2.10.4. Минимальный диаметр сопла двухкомпонентной форсунки на выходе

$$d_{с\phi} = \sqrt{\frac{4F_{\phi}}{\pi}}. \quad (152)$$

2.10.5. Чертится спроектированная двухкомпонентная струйно-струйная газожидкостная форсунка с внутренним смешением по полученным геометрически размерам в масштабе 10:1 или 5:1.

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

$$\Delta p_{\phi,ок,я} = \Delta p_{\phi,ок,пр}, \quad \Delta p_{\phi,л,я} = \Delta p_{\phi,л,пр}. \quad (153)$$

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине  
«Конструирование камер жидкостных ракетных двигателей» для  
студентов специальности 160700.65, 24.05.02 «Проектирование  
авиационных и ракетных двигателей» очной формы обучения

Составители: Геннадий Иванович Скоморохов  
Андрей Александрович Гуртовой

В авторской редакции

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