

Расчет основных параметров ЖРД

Расчет камер ЖРД

Коэффициент, отражающий разницу между статическим давлением p_k и полным давлением p_{k0}

$$\delta_k = \frac{p_k}{p_{k0}}, \rightarrow F_k \boxtimes 1 \Rightarrow \delta_k = 1;$$

Средняя осевая скорость впрыска $W_{cp} = \frac{K_{\tilde{a}}}{K_{\tilde{a}}+1} W_{o\hat{e}} + \frac{1}{K_{\tilde{a}}+1} W_{\tilde{a}};$ $K_{\tilde{a}} = \frac{\dot{m}_{\hat{e}}}{\dot{m}_{\tilde{a}}}.$

Схема без дожигания генераторного газа $W_{cp} = 15 \div 20 \hat{i} / \tilde{n};$

Схема с дожиганием одного компонента (Г+Ж) $W_{cp} = 80 \div 120 \hat{i} / \tilde{n};$

Схема с дожиганием двух компонентов (Г+Г) $W_{cp} = 150 \div 180 \hat{i} / \tilde{n}.$

Газодинамический расчет камеры сгорания

Задачей газодинамического расчета камеры является определение основных ее геометрических размеров, расчет ожидаемых характеристик и построение газодинамического профиля КС и сопла. Исходными данными расчета служит основной или номинальный режим, на котором заданы:

- а) тяга P_H и высота H или атмосферное давление p_H ;
- б) давление в камере сгорания p_k и давление на срезе сопла p_a ;
- в) топливо и соотношение компонентов \mathcal{X} или коэффициент избытка окислителя α ;
- г) данные термодинамического расчета горения топлива и истечения продуктов сгорания при заданных p_k , p_a , \mathcal{X} или α .

Определение диаметров критического сечения и среза сопла.

I. Из данных термодинамического расчета находим теоретические значения величин: $\mathcal{J}_{п.т.}$, $K_{п.т.}$, $C_{*т.}$ и \bar{F}_a . Определив значения коэффициентов φ_k и φ_c в первом приближении по статистическим или приближенным соображениям, вычисляем ожидаемые значения:

$$K_{п.ож} = K_{п.т.} \varphi_c; \quad C_{*ож} = C_{*т.} \varphi_k; \quad \mathcal{J}_{п.ож} = \mathcal{J}_{п.т.} \varphi_{уд},$$

где $\varphi_{уд} = \varphi_k \cdot \varphi_c$.

2. Определяем диаметр критического и выходного сечений сопла. Для этого удобно воспользоваться соотношением

$$P_H = (K_{п} - \bar{F}_a \frac{P_H}{P_K \epsilon_K}) F_{кр} P_K \epsilon_K :$$

а) в первом приближении примем, что КС – изобарическая и коэффициент $\epsilon_K = 1$, тогда имеем

$$F'_{кр} = \frac{P_H}{(K_{пox} - \bar{F}_a P_H / P_K)} \longrightarrow d'_{кр};$$

б) находим относительную площадь КС. Если воспользоваться рекомендациями, приведенными ниже, то \bar{F}_K можно определить по формуле (I.50):

$$\bar{F}_K = \frac{500 \cdot 10^3}{\sqrt{10 P_K d_{кр}^3}}$$

(P_K – в паскалях, $d_{кр}$ – в миллиметрах).

По найденной величине \bar{F}_K , воспользовавшись газодинамическими соотношениями и рекомендациями разд. I.I, вычисляем коэффициент снижения давления по камере $\epsilon_K = \epsilon_{K0} / \delta_K$;

в) во втором приближении диаметр критического сечения будет

$$F_{кр}'' = \frac{P_H}{(K_{пож} - \bar{F}_a \frac{P_H}{P_K \epsilon_K}) P_K \epsilon_K} \longrightarrow d_{кр}'';$$

г) находим размеры сечения среза сопла

$$F_a = \bar{F}_a \cdot F_{кр}'' \longrightarrow d_a.$$

При найденных размерах выходного сечения сопла, соответствующих данной относительной площади среза \bar{F}_a , давление на срезе сопла будет $P_a' = \epsilon_K P_a$, т.е. несколько меньше принятого для номинального режима. В большинстве случаев это уменьшение P_a особой роли не играет, так как оно имеет место при принятой относительной площади среза сопла \bar{F}_a и соответствующего ей коэффициента тяги в

Расчет основных характеристик камеры производим по следующим соотношениям:

1. Зависимость тяги камеры $P_H = (K_{пож} F_{кр} \epsilon_K) P_K - (F_a) P_H$.
2. Зависимость секундного расхода топлива через камеру

$$\dot{m}_K = \left(\frac{F_{кр} \epsilon_K}{C_{*ож}} \right) P_K.$$

3. Зависимость ожидаемого удельного импульса камеры

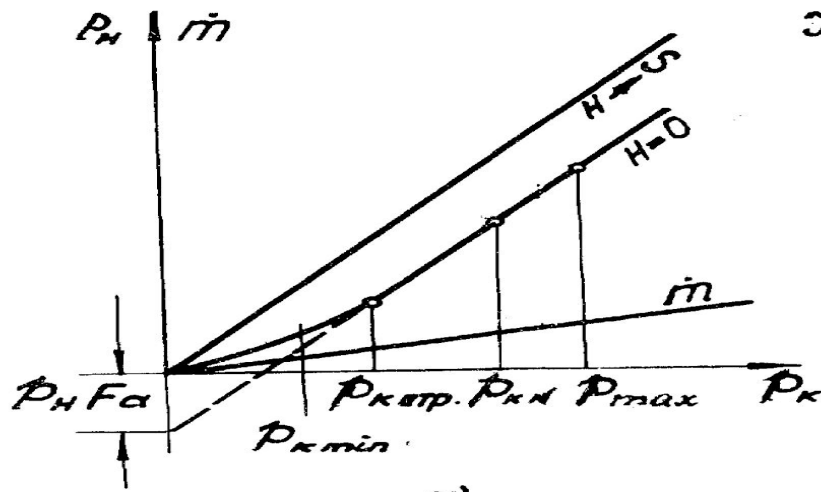
$$J_{H_{ож}} = P_H / \dot{m}_K.$$

4. Давления в КС и в атмосфере, при которых наступает отрыв потока от стенки сопла:

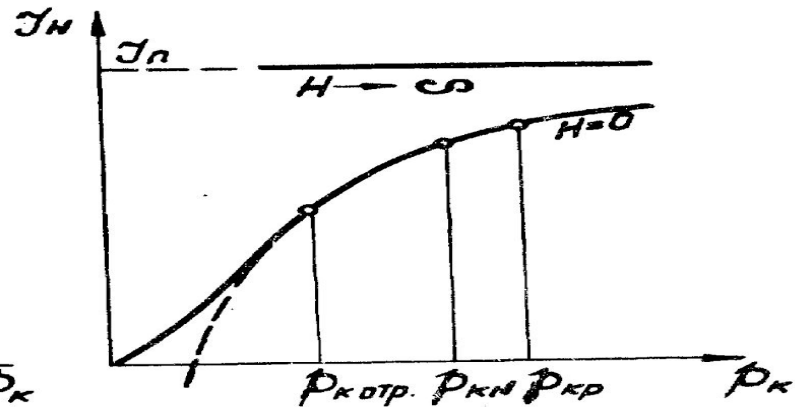
$$P_{K_{отр}} = 0,713 P_H \left(\frac{P_K}{P_a} \right)^{0,833} \varepsilon_K^{-0,167}; \quad P_{H_{отр}} = \frac{P_K}{0,713 \left(\frac{P_K}{P_a} \right)^{0,833} \varepsilon_K^{-0,167}}, \quad (I.47)$$

здесь (P_K / P_a) - расчетная степень расширения сопла.

В заключение расчета характеристик остается построить их графическое изображение в виде зависимостей $(P_H, J_H)_H = F(P_K)$; $(P_H, J_H) = F(H, P_H)$, т.е. дроссельные (рис. I.12) и высотные (рис. I.13) характеристики.



а)



б)

Рис. 1.12. Дроссельные характеристики камеры:
а - тяга и расход; б - удельный импульс

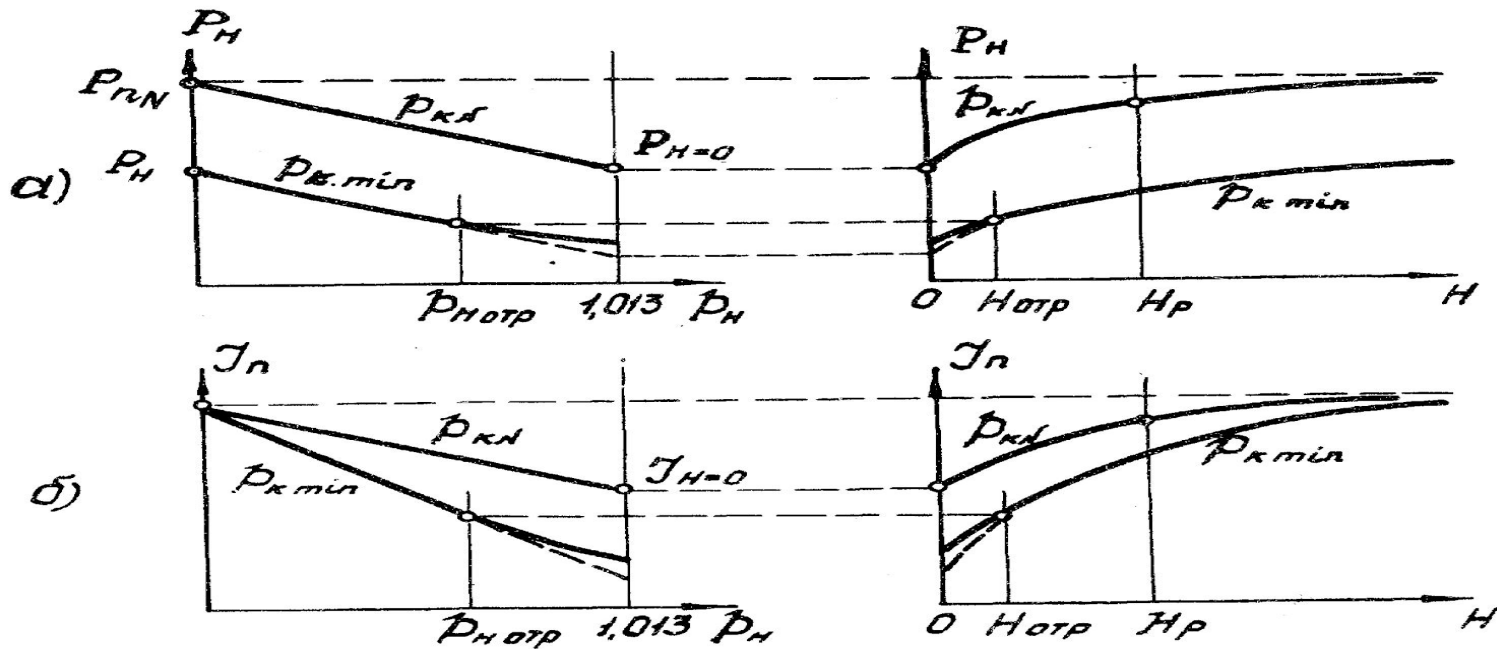


Рис. 1.13. Высотные характеристики камеры:
а - тяга; б - удельный импульс

Расчет и построение газодинамического профиля камеры производится после расчета и определения контура. В двигателестроении наибольшее распространение получили цилиндрическая форма камеры сгорания с плоской смесительной головкой и профилированное сопло.

Для построения профиля такой КС надо определить объем, длину цилиндрической части, диаметр камеры, форму и длину входной части сопла.

Объем камеры сгорания V_k , который включает в себя объем камеры до критического сечения, количественно может быть задан приведенной длиной $l_{пр} = V_k / F_{кр}$; длину КС удобно характеризовать условной длиной $l_k = V_k / F_k$.

Если известны $l_{пр}$ и l_k , то можно определить другую геометрическую характеристику КС – ее относительную площадь $\bar{F}_k = (F_k / F_{кр}) = (l_{пр} / l_k)$, а затем диаметр камеры $d_k = d_{кр} \sqrt{\bar{F}_k}$.

$$l_{np} = A/\sqrt{p_k} ; \quad l_k = B \sqrt{d_{kp}} , \quad (I.48)$$

где A и B – некоторые постоянные коэффициенты.

На основании обобщения статистических данных можно рекомендовать следующие расчетные соотношения:

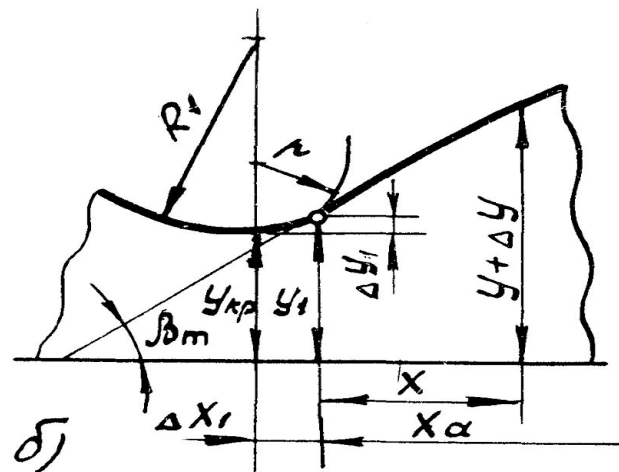
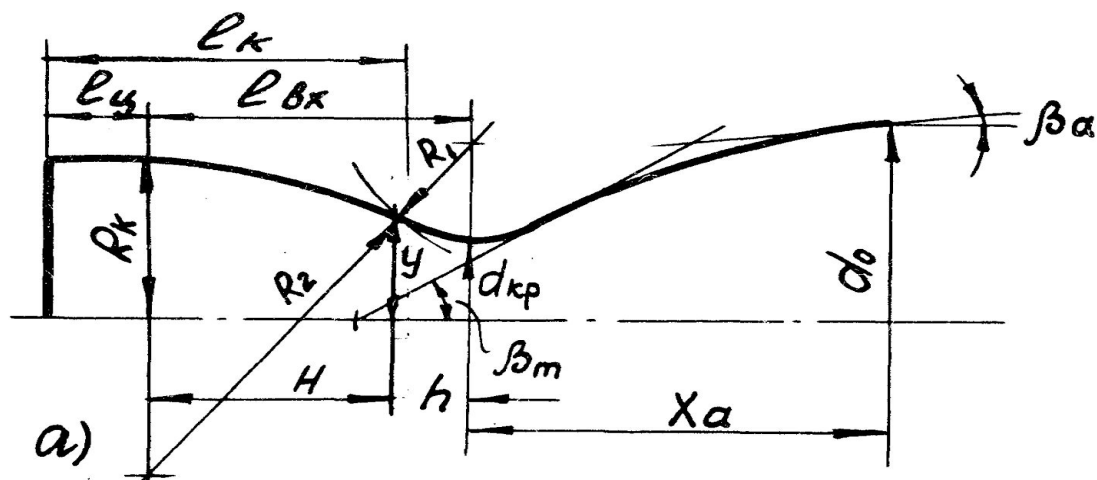
$$l_{np} = \frac{(15-12,5) \cdot 10^3}{\sqrt{10 p_k}} ; \quad l_k = (0,03-0,025) \sqrt{d_{kp}} , \quad (I.49)$$

здесь первый коэффициент следует брать при жидкостно-жидкостной КС (двигатель без дожигания генераторного газа); второй – при газо-жидкостной КС (двигатель с дожиганием генераторного газа).

(p_k – в паскалях, d_{kp} – в миллиметрах, l_{np}, l_k – в метрах).

Используя эти соотношения, относительная площадь КС будет

$$\bar{F}_k = \frac{l_{np}}{l_k} = \frac{500 \cdot 10^3}{\sqrt{10 p_k d_{kp}}} . \quad (I.50)$$



Форма входной части сопла может быть разной. Например, будем ее выполнять по двум сопряженным радиусам $R_1 = d_{кр}$ и R_2

Причем с повышением p_k радиус R_2 следует брать большим – при меньшей кривизне контура входной части сопла более устойчиво сохраняется низкотемпературный пристеночный слой и завеса охлаждения от перемешивания с ядром потока, т.е. теплозащита стенки будет более надежной. Поэтому можно рекомендовать:

p_k , МПа	< 5	5...10	10...15	15...20	> 20
ρ	1...1,5	1,5...2	2...3	3...4	4...5

где $\rho = (R_2 / R_k)$, $R_k = 0,5 d_{кр} \sqrt{F_k}$.

При принятой форме входной части сопла ее длина будет

$$l_{bx} = 0,5 d_{кр} \sqrt{(2 + \rho \sqrt{F_k})^2 - [(\rho - 1) \sqrt{F_k} + 3]^2}, \quad (1.51)$$

и координаты точки сопряжения дуг окружностей R_1 и R_2 (рис.1.14,а) можно записать так:

$$h/l_{bx} = 2/(2 + \rho \sqrt{F_k}); \quad H/l_{bx} = 1 - (h/l_{bx});$$

$$\bar{y} = (y/y_{кр}) = (h/l_{bx}) \sqrt{F_k} + H/l_{bx}.$$

Порядок расчета и построения газодинамического профиля камеры двигателя следующий.

1. По известным R_k и $d_{кр}$, используя приведенные выше рекомендации, вычисляем геометрические параметры КС: $l_{пр}$, l_k , V_k , \bar{F}_k , l_{bx} , $d_k = 2R_k$ и координаты точки сопряжения (h/l_{bx}) , (H/l_{bx}) , \bar{y} .

2. Находим длину цилиндрической части КС:

$$l_u = (V_k - \Delta V_{bx}) / F_k,$$

где ΔV_{bx} - объем входной части. С достаточной точностью можем записать

$$\Delta V_{bx} = F_{кр} l_{bx} \left\{ [(2\bar{F}_k + \bar{y}^2)H/3l_{bx}] + [(\bar{y}^2 + \bar{y} + 4)h/6l_{bx}] \right\}. \quad (I.52)$$

3. После вычисления параметров контура КС к ней пристыковывается контур профилированного сопла, образуя вместе газодинамический профиль камеры двигателя. Основное достоинство профилированных сопел - сокращение продольных габаритов сопла при снижении потерь удельного импульса. Методы профилирования контура сопла изложены в работах [4, 6].

Используя методику, приведенную в [2, 6], по известным величинам (относительному диаметру выходного сечения сопла $\bar{d}_a = \sqrt{\bar{F}_a}$; углу непараллельности на срезе β_a , обычно его принимают $2\beta_a = (10 \dots 16)^\circ$; среднему показателю изоэнтропы k расширения ПС в сопле) находим: угол касательной к контуру в критическом сечении β_m и относительную длину сверхзвуковой части сопла $\bar{x}_a = (x_a / y_{кр})$.

По этим данным либо производится непосредственное построение контура сопла, либо вычисляются координаты контура по соответствующей методике. Эти данные позволяют построить так называемое угловое сопло.

4. Если решено "скруглить" угловую точку, например радиусом $\bar{r} = (r / d_{кр}) = 0,1 \dots 0,2$, то, вычислив координаты точки сопряжения дуги окружности радиуса r с контуром профиля (см. рис. 1.14, б), по формулам

$$\Delta x_1 = r \sin \beta_m; \quad \Delta y_1 = r(1 - \cos \beta_m); \quad y_1 = y_{кр} + \Delta y_1$$

геометрически сопрягают найденный предварительно контур углового сопла с дугой окружности, считая начало контура теперь в сечении y_1 .

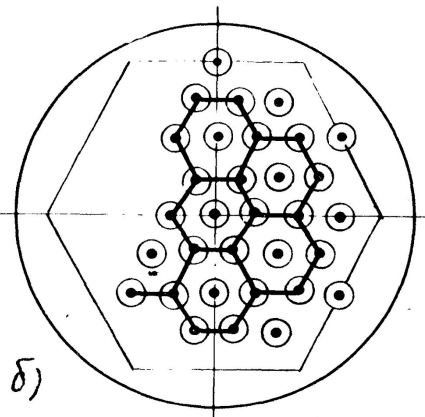
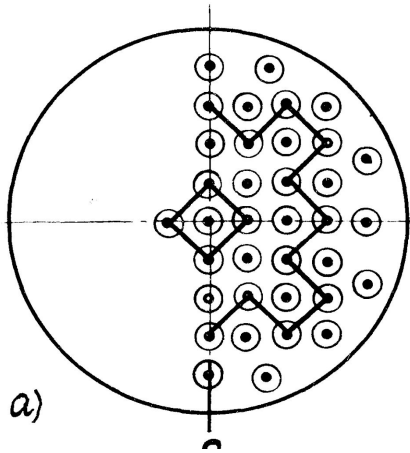
Если ранее были вычислены координаты углового сопла x и y , то при скруглении угловой точки следует отсчет координаты x вести от сечения y_7 , а координату y надо увеличить на поправку б):

$$\Delta y = \Delta y_7 (1 - x/x_a).$$

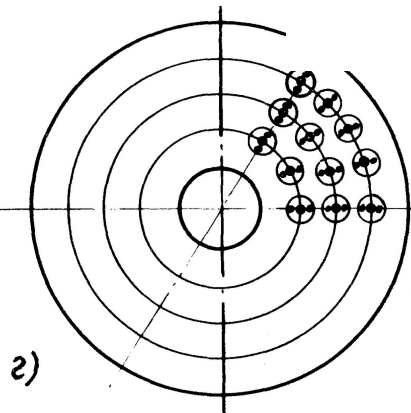
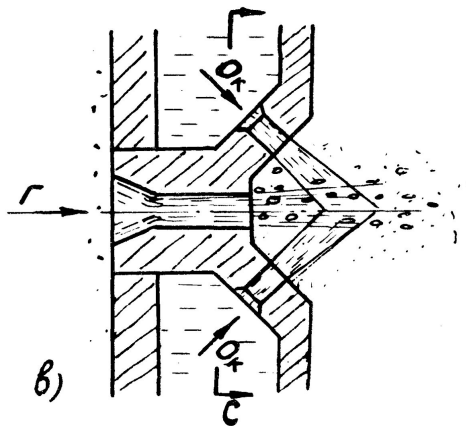
5. В результате построения контура камеры сгорания и сопла, как показано на рис. I.14, получаем газодинамический профиль камеры двигателя, определяющий внутренние ее обводы.

Проектирование системы смесеобразования

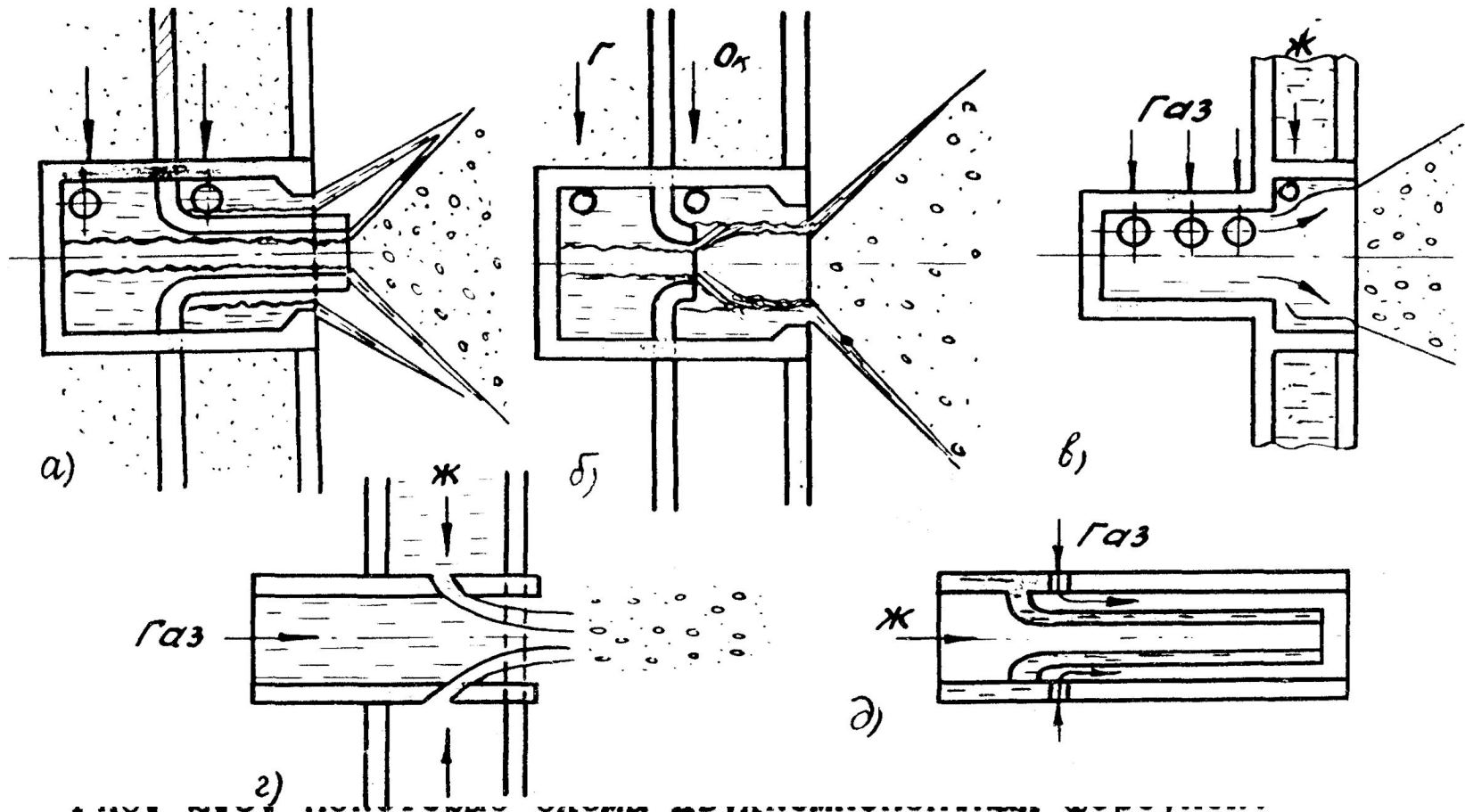
Смесительные головки, образованные различным расположением форсунок окислителя и горючего



а - шахматная схема; б - сотовая схема; в - форсуночная ячейка из струйных форсунок; г - схема расположения форсуночных ячеек на головке



Схемы некоторых смесительных элементов



а - центробежно-центробежная с внешним смещением компонентов;
 б - центробежно-центробежная с внутренним смещением компонентов;
 в - центробежно-центробежная газожидкостная с внутренним смещением;
 г - струйно-струйная газожидкостная; д - коаксиальная газожидкостная

Число форсунок может быть задано шагом между ними. Исходя из опыта можно рекомендовать выбирать шаг между форсунками по соотношениям:

струйные жидкостные форсунки

$$t_{\varphi} = 0,4 \sqrt{d_{\kappa}}, \text{ мм};$$

однокомпонентные жидкостные центробежные форсунки

$$t_{\varphi} = 0,8 \sqrt{d_{\kappa}}, \text{ мм};$$

двухкомпонентные жидкостные центробежные форсунки

$$t_{\varphi} = 1,2 \sqrt{d_{\kappa}}, \text{ мм};$$

двухкомпонентные газожидкостные форсунки

$$t_{\varphi} = 1,5 \sqrt{d_{\kappa}}, \text{ мм}.$$

Учитывая конструктивные и производственные возможности, минимальное значение шага рекомендуется ограничить: между струйными жидкостными форсунками (4...5) мм; между центробежными жидкостными - (9...10) мм. Отсюда следует, что с уменьшением диаметра головки, т.е. камеры сгорания, на ней будет меньше форсунок.

С уменьшением числа форсунок возрастает, с одной стороны, неравномерность распределения компонентов по сечению КС, с другой – доля топлива, сгорающего в пристеночном слое, т.е. не с оптимальным соотношением компонентов.

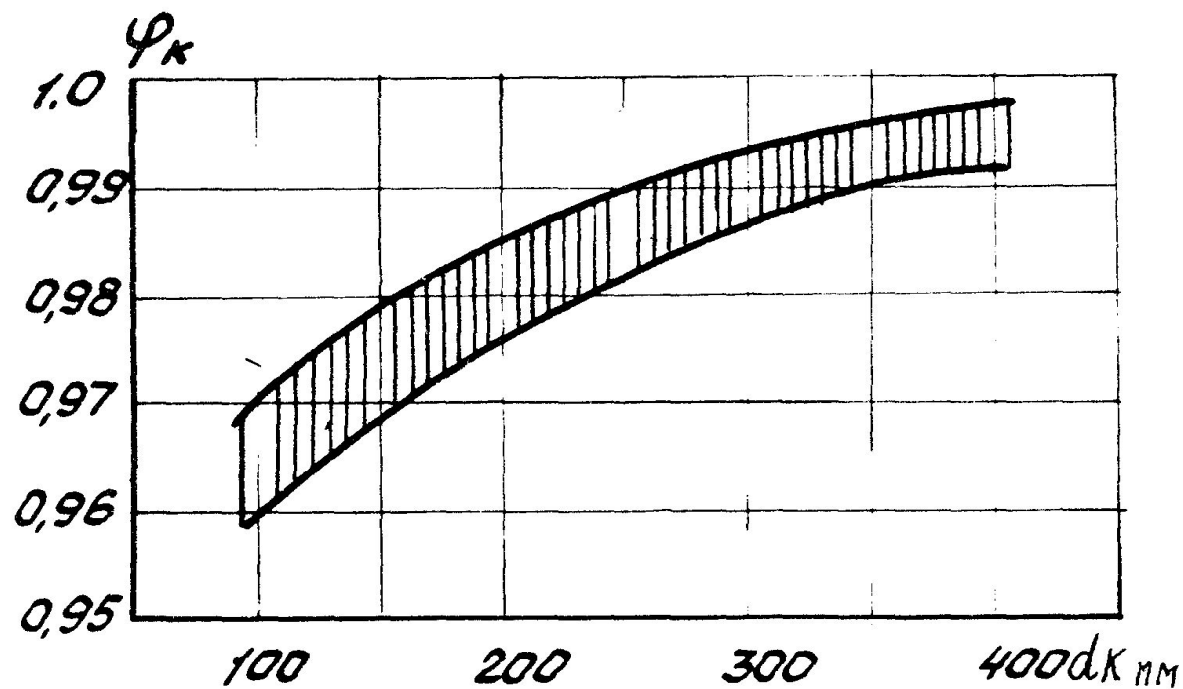


Рис. 2.9. Примерная зависимость полноты сгорания от диаметра камеры

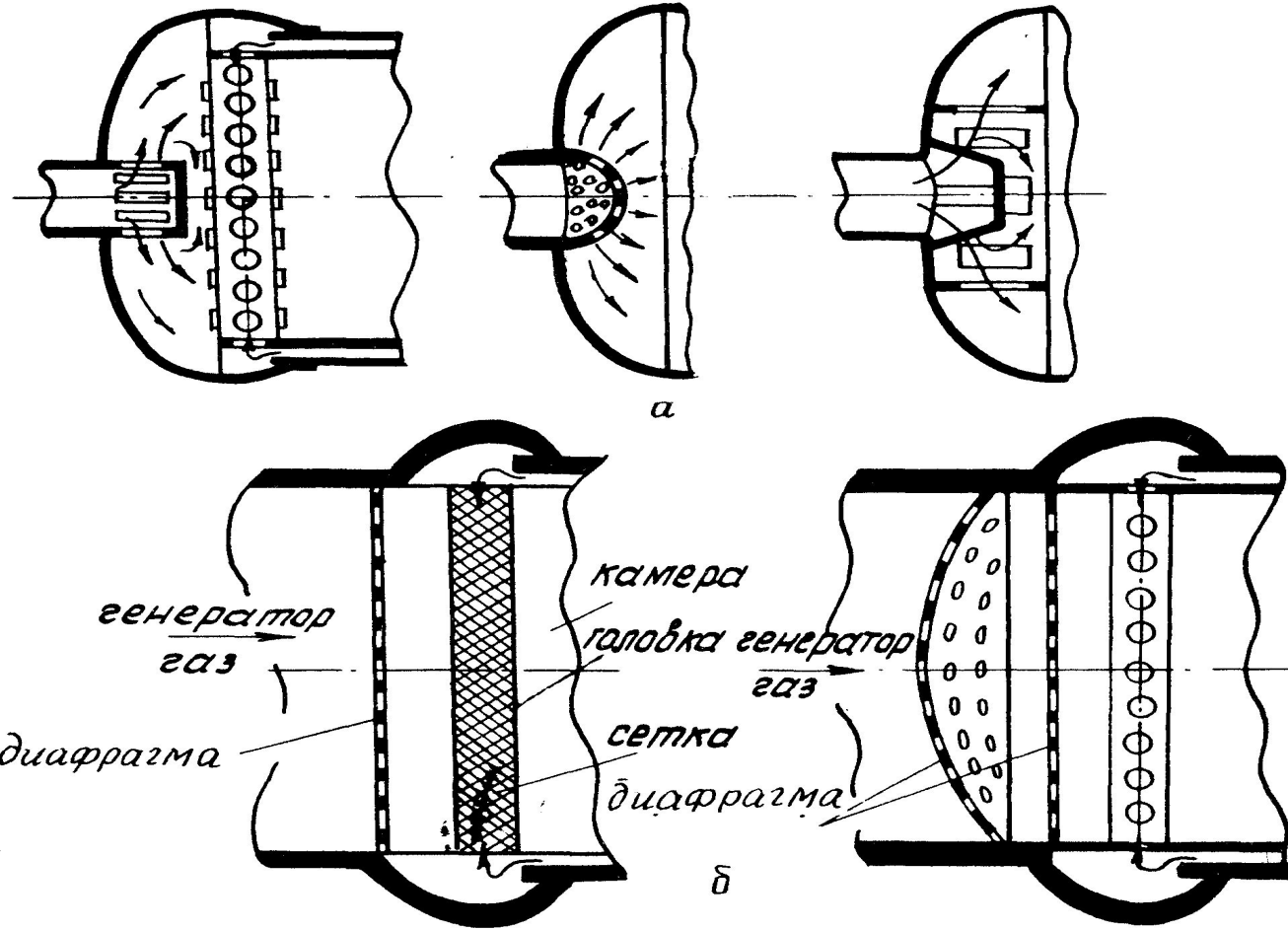
Организация внутреннего охлаждения

Внутреннее охлаждение может осуществляться:

а) созданием низкотемпературного пристеночного слоя путем сжигания в пристенной области компонентов топлива с большим избытком либо горючего – восстановительный пристеночный слой, либо окислителя – окислительный пристеночный слой (применяется редко). Это осуществляется соответствующей компоновкой форсунок на периферийной части головки и подбором их расходных характеристик;

б) применением завесного пленочного или заградительного охлаждения путем подачи из специальных устройств (поясов) непосредственно на внутреннюю поверхность стенки жидкого горючего – завесное охлаждение (в большинстве случаев) или газообразного горючего – заградительное охлаждение.

Проектные схемы организации внутреннего охлаждения зависят от типа камеры сгорания (жидкостно-жидкостная, газожидкостная, газо-газовая), диаметра КС, конструкции форсунок и смесительной головки, а также величины максимального давления в КС и рода компонентов.



Некоторые конструктивные схемы ввода
компонентов в полости головки:

а - в схемах "жидкость + жидкость"; б - в схемах
"газ + жидкость"

Низкотемпературный пристеночный слой, который формируется в области между стенкой и условной линией, проведенной по центрам ближайших окислительных форсунок (при восстановительном слое), можно организовать следующим образом.

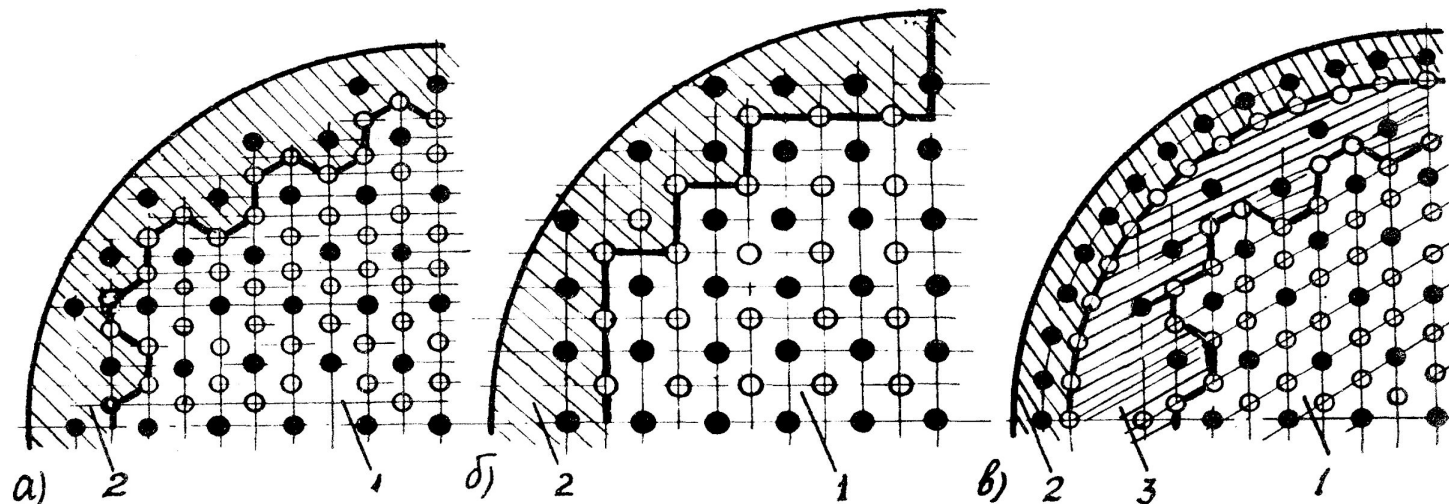
I. При однокомпонентных форсунках:

а) на периферийной части головки размещаются неполные смеси-тельные элементы – без окислительных форсунок со стороны стенки (восстановительный пристеночный слой) (рис. 2.II,а,б). В этом случае при одинаковых расходных характеристиках форсунок соотношения компонентов в ядре потока $x_{я}$ и в пристеночной области $x_{ст}$ будут

$x_{ст} \approx \frac{1}{2} x_{я}$. Иногда, например, при шахматной схеме расположения

форсунок, которая хуже вписывается в окружность, приходится ставить в пристенной области специальные форсунки, прикрывающие окислительные (см. рис. 2.I2,б). В некоторых случаях изменяют и расходные характеристики пристеночных форсунок: увеличивают расход у форсунок горючего и уменьшают расход окислительных форсунок.

Эти схемы организации низкотемпературного пристеночного слоя распространены в КС с давлением $p_k \ll (4...5)$ МПа и в газогенераторах. Основной недостаток этих схем – значительная неоднородность по соотношению компонентов и расходу напряженности по периметру пристеночного слоя;



1 - ядро потока; 2 - пристеночный слой; 3 - промежуточный слой

б) на периферийной части головки располагается по окружности специальный пристеночный пояс форсунок. В этом случае пристеночный слой получается достаточно однородным по периметру, и его эффективность возрастает. Такая схема может обеспечить надежное внутреннее охлаждение до давления в КС $p_k \ll (7...8)$ МПа.

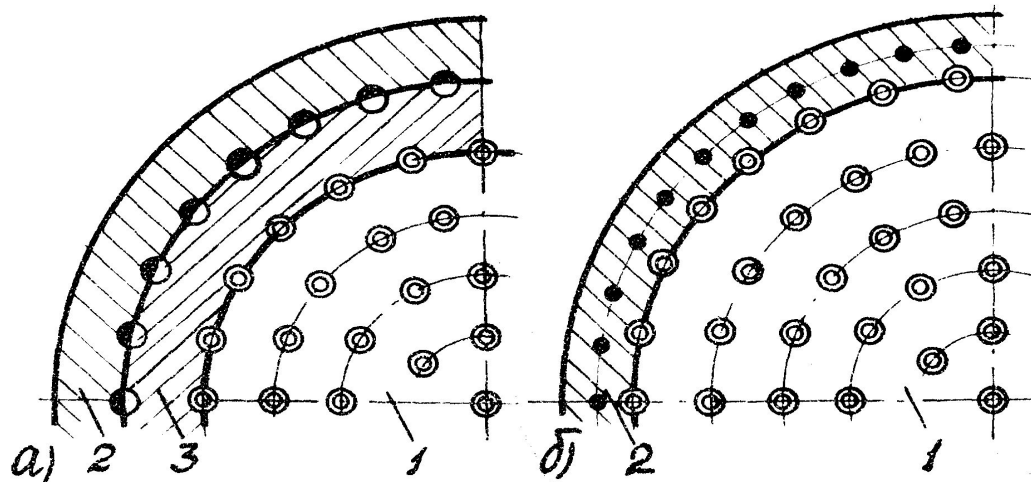


Рис. 2.12. Различные схемы организации низкотемпературного пристеночного слоя продуктов сгорания при двухкомпонентных форсунках:

1 – ядро потока – двухкомпонентные форсунки; 2 – пристеночный слой; 3 – промежуточный слой; \odot – форсунка ядра; \bullet – двухкомпонентная пристеночная форсунка; \otimes – однокомпонентная форсунка

2. При двухкомпонентных форсунках размещаются на последней окружности со стороны стенки:

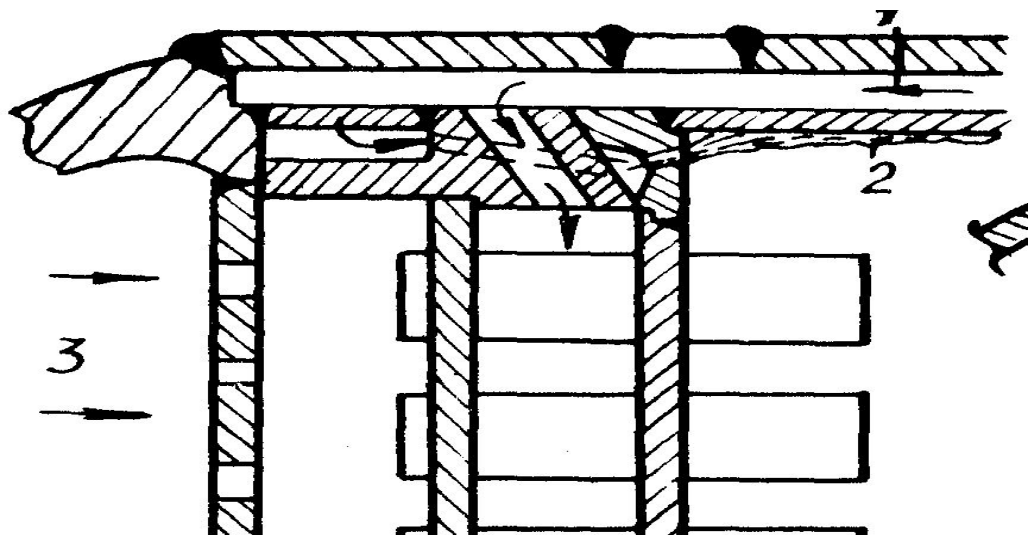
- а) однокомпонентные форсунки горючего (рис. 2.12, а);
- б) двухкомпонентные форсунки (рис. 2.12, б), имеющие соотношение компонентов, соответствующее $x_{ст}$. Недостаток этой схемы – по-

явление промежуточного слоя. Обе эти схемы могут обеспечить надежное внутреннее охлаждение до давления в КС $p_k \ll (10 \dots 12)$ МПа.

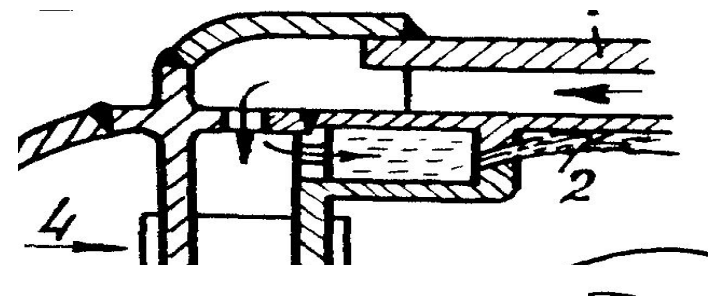
Завесное пленочное или заградительное охлаждение

1) пояса внутреннего охлаждения располагают непосредственно возле смесительной головки, причем пояса могут быть элементом конструкции головки. Эта схема часто используется в случаях, когда все форсунки на смесительной головке - однородные, с одинаковыми расходными характеристиками, например:

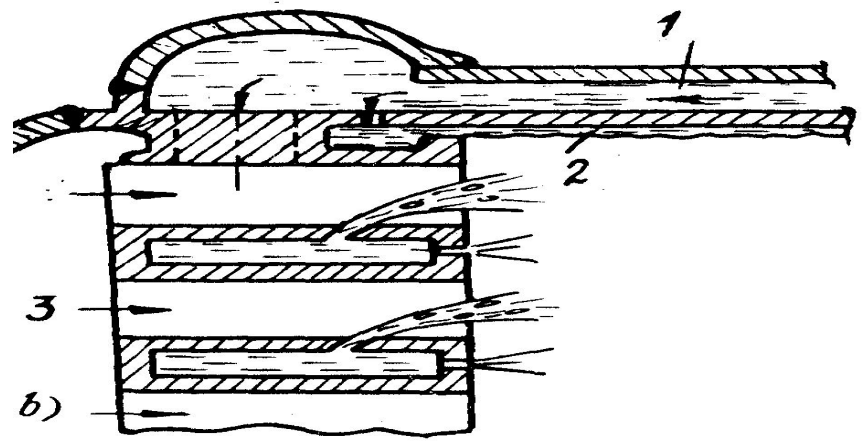
а) при двухкомпонентных форсунках на периферии головки устанавливается специальный пояс струйных форсунок горючего, через которые жидкое горючее подается на стенку, образуя на ней сплошную пленку



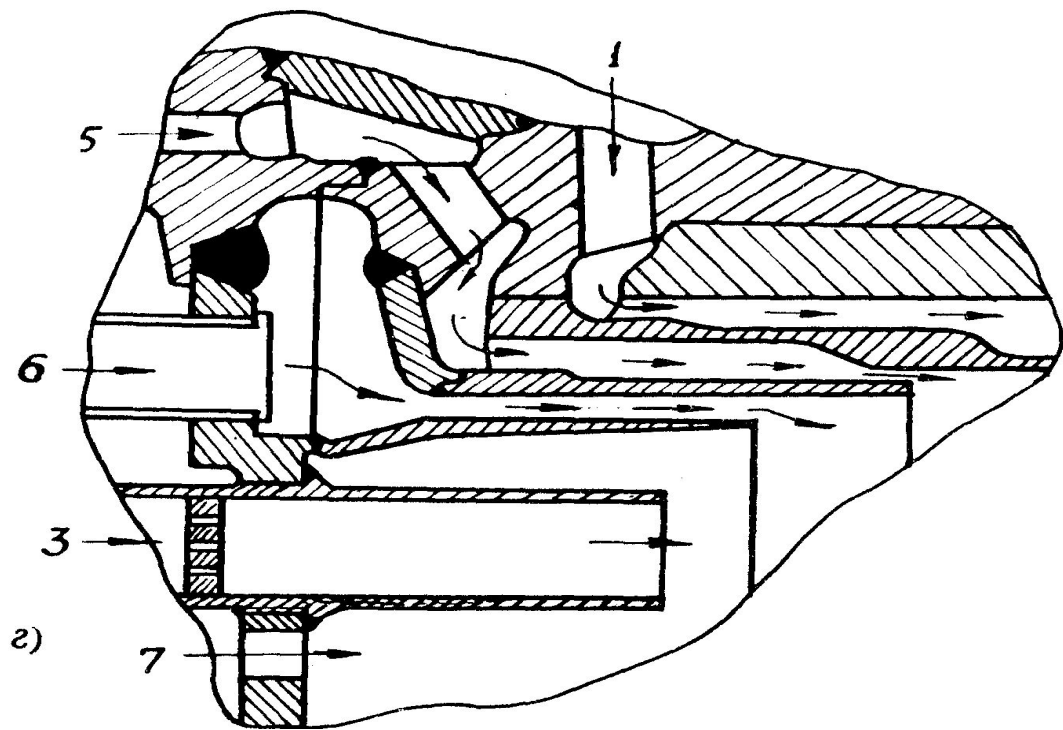
б) при двухкомпонентных форсунках и малом диаметре КС ($d_k < 200$ мм) иногда на периферии головки устраивается специальный коллектор, на котором располагаются струйные форсунки, подающие жидкое горючее на стенку. Такая конструкция завесы несколько лучше сохраняет ее от взаимодействия и перемешивания с основным потоком продуктов сгорания;



в) при щелевой смесительной головке завеса создается специальным щелевым завесным поясом, из которого горючее поступает на стенку

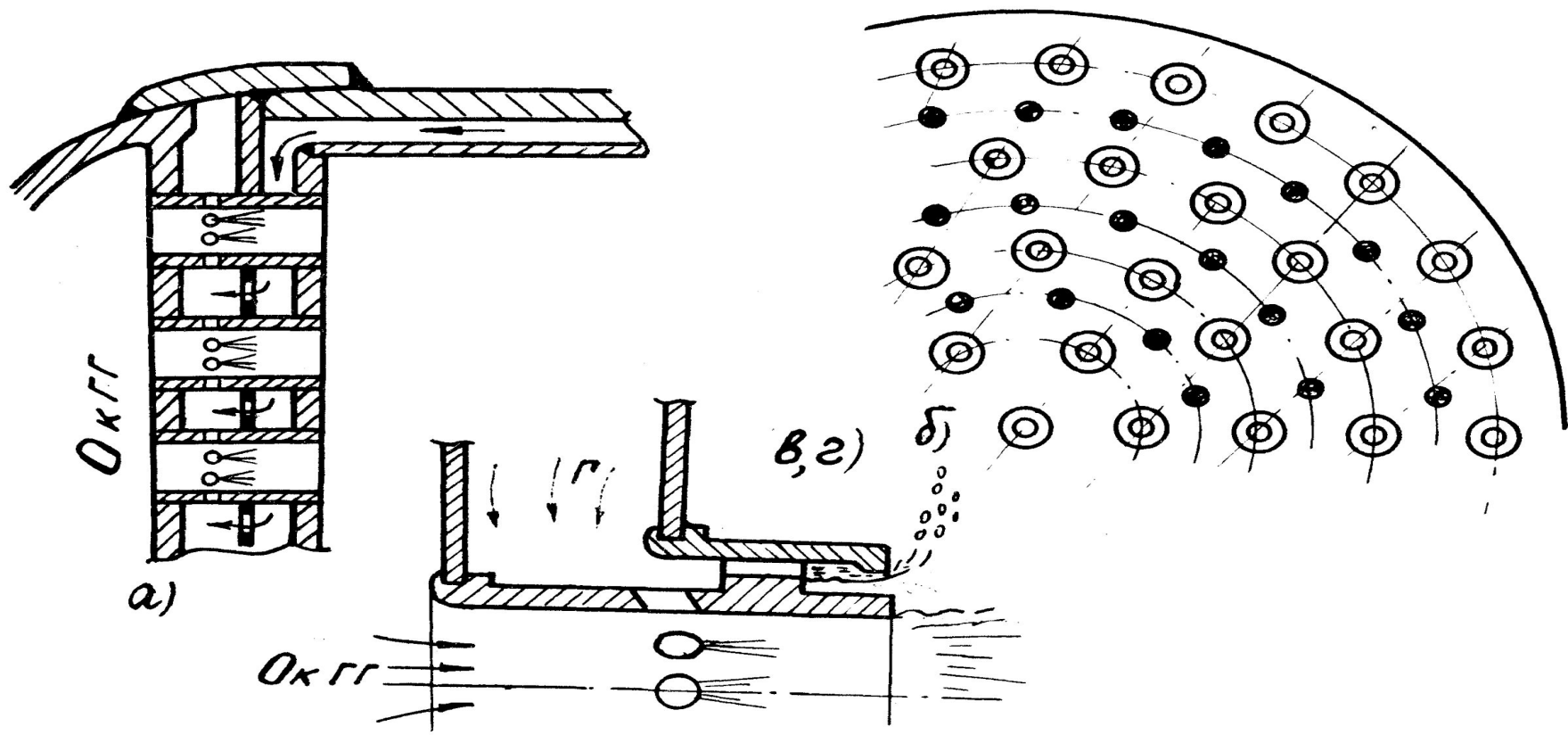


г) при трубчатой смесительной головке, характерной для газогазовых камер с высоким давлением в КС, $p_k \gg (250 \dots 30)$ МПа, внутреннее охлаждение обеспечивается путем вдува вдоль стенки из специальных щелевых поясов потоков генераторных газов: восстановительного непосредственно возле стенки и параллельного ему окислительного. Эти слои газов, перемешиваясь и выгорая, образуют низкотемпературный заградительный слой ПС.



Проектируя смесительную головку, особенно газожидкостных и газо-газовых камер сгорания, необходимо принимать меры для обеспечения теплозащиты самой смесительной головки, так как в этих КС интенсивное горение начинается непосредственно возле огневого днища головки и форсунок. Это может осуществляться разными способами:

а) организацией проточного охлаждения переднего днища головки путем устройства в полости головки специальной перегородки-дефлектора, направляющего компонент вдоль переднего днища с достаточной скоростью до его попадания в форсунки



б) устройством защиты головки путем установки специальных малорасходных форсунок горючего между основными двухкомпонентными форсунками б);

в) использованием на головке двухкомпонентных форсунок со специальной наружной центробежной форсункой горючего. В целом такая форсунка будет, например, струйно-струйно-центробежной, как показано на рис. в. Здесь наружная центробежная форсунка имеет большой угол распыла и малый расход. Она специально предназначена для

обеспечения защиты головки путем насыщения примыкающего к головке пространства избытком горючего;

г) выдвиганием торцов форсунок далеко вперед от днища головки, причем сами выступающие в КС форсунки должны иметь достаточное охлаждение компонентом (см. рис. , г).

РАСЧЕТ СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ И ОЖИДАЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ КАМЕРЫ

Исходными данными расчета смесеобразования являются, с одной стороны, газодинамический расчет, в результате которого определены геометрические параметры камеры и расходы компонентов на номинальном или расчетном режиме, а с другой стороны, конструктивная схема смесительной головки – конструктивные схемы форсунок, их расположение и их количество. Кроме того, необходимо иметь зависимости основных теоретических значений термодинамических параметров: $\mathcal{J}_{пг}$, c_T , $K_{пг}$, T_K , k по соотношению компонентов или, как принято в термодинамических расчетах, по коэффициенту избытка окислителя, причем в широком диапазоне их изменения, например, $\alpha = (0,3 \dots 1,3 \dots 1,4)$ при выбранных давлениях в камере сгорания p_K и на срезе сопла p_a , которые соответствуют номинальному режиму. Эти значения p_K и p_a определяют и величину относительной площади среза сопла \bar{F}_a , которая принимается для данной камеры



α	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,5
φ	1,022	1,704	2,045	2,385	2,726	3,067	3,408	4,089	5,111
ψ	0,5054	0,6302	0,6716	0,7046	0,7316	0,7541	0,7731	0,8035	0,8364
T_K	1586	2889	3394	3650	3739	3754	3738	3670	3537
C_p	4,481	2,536	3,411	5,036	6,357	6,835	6,809	6,214	5,092
M	16,08	19,05	21,14	22,80	24,07	25,07	25,91	27,24	28,68
T_a	822,2	847,5	1007	1299	1641	2028	2180	2011	1630
R	1,143	1,225	1,217	1,186	1,152	1,122	1,111	1,119	1,143
J_n	2811	3205	3408	3549	3630	3654	3612	3474	3262
C_x	1388	1716	1793	1808	1789	1759	1727	1669	1596
K_n	2,025	1,868	1,901	1,963	2,029	2,077	2,091	2,081	2,044
\bar{F}_a	92,99	66,87	65,94	73,05	83,22	95,87	101,2	97,26	86,63



α	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,00	1,20	1,50
φ	0,9186	1,531	1,837	2,143	2,450	2,756	3,062	3,674	4,593
ψ	0,4788	0,6049	0,6475	0,6818	0,7101	0,7338	0,7538	0,7861	0,8212
T_K	1768	2774	3115	3338	3447	3474	3458	3371	3194
C_p	2,551	2,446	2,809	3,546	4,482	5,012	5,028	4,432	3,437
M	15,23	18,97	20,63	22,06	23,23	24,15	24,83	26,03	27,17

T_a	761,1	782,2	838,1	980,7	1138	1312	1524	1283	1044
R	1,176	1,234	1,237	1,220	1,199	1,176	1,151	1,174	1,20
J_n	2894	3125	3231	3317	3379	3420	3433	3252	3015
C_x	1476	1682	1726	1745	1741	1719	1691	1632	1550
K_n	1,961	1,858	1,872	1,901	1,941	1,990	2,030	1,993	1,945
\bar{F}_a	83,79	64,75	62,02	64,84	69,17	75,16	83,97	75,90	68,73

газодинамические соотношения

$$K_n = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \frac{\lambda_a^2}{2}; \quad \bar{F}_a = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} / \lambda_a \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_a^2\right)^{\frac{1}{k-1}},$$

Внутреннее охлаждение, его схему и параметры необходимо назначить или выбрать при проектировании и расчете системы смесеобразования. Как уже сказано, внутреннее охлаждение в общем случае состоит из организации низкотемпературного пристеночного слоя и завесного или заградительного охлаждения.

Наиболее часто температуру продуктов сгорания в пристеночном слое принимают равной 2300...3000 К. В соответствии с зависимостью температуры от коэффициента избытка окислителя α или соотношения компонентов x назначаются α_{CT} или x_{CT} , соответствующие выбранной средней температуре продуктов сгорания в пристеночном слое.

Относительный расход компонента через пояс завесы охлаждения $\bar{m}_3 = \dot{m}_3 / m_k$ назначается в зависимости от задачи, возлагаемой на завесу, конструктивной схемы смесительной головки и давления в камере на номинальном режиме. Можно рекомендовать:

а) $\bar{m}_3 = (0,06 \dots 0,08)$ при отсутствии специального пристеночного слоя, создаваемого форсунками на смесительной головке, расположении пояса завесы непосредственно возле головки (он может быть конструктивно объединен с головкой) и давлении в камере сгорания $p_k = (10 \dots 15)$ МПа;

б) $\bar{m}_3 = (0,04 \dots 0,06)$ при наличии пристеночного слоя, создаваемого форсунками на головке, давлении в камере сгорания $p_k = (10 \dots 15)$ МПа и расположении пояса завесы в средней части камеры сгорания; $\bar{m}_3 = (0,02 \dots 0,04)$ при расположении пояса в конце камеры сгорания или на входной части сопла;

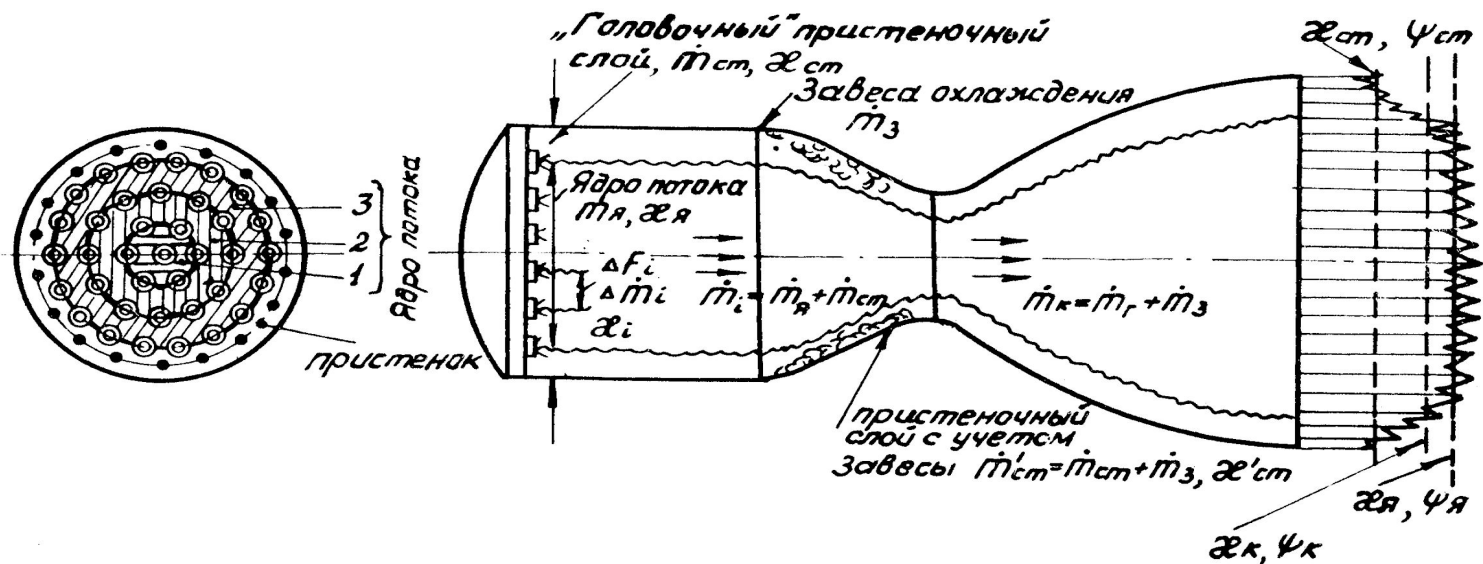
в) при решении установить несколько последовательных поясов завесы суммарный расход через все завесы можно назначить несколько меньшим, примерно равным $(0,50 \dots 0,75)$, от рекомендованного выше для одной завесы;

г) при меньшем давлении в камере сгорания $p_k = (5 \dots 8)$ МПа расходы следует снизить до $(0,50 \dots 0,75)$ от рекомендованных; при большем давлении ($p_k = (20 \dots 30)$ МПа) расходы следует увеличить до $1,5 \dots 2,0$ от рекомендованных.

Распределение расходов по слоям потока и форсункам – следующий шаг расчета смесеобразования. Примем модель потока продуктов сгорания, состоящей из ядра, пристеночного слоя и завесного или заградительного охлаждения. Ядро потока и пристеночный слой также могут, в свою очередь, состоять из отдельных струй, формируемых смесительными элементами на отдельных участках смесительной головки и характеризующихся своими термодинамическими параметрами.

Исходные данные, принимаемые в примерах расчета смесеобразования. Примем, что основные форсунки на головке – двухкомпонентные, число которых n . Форсунки располагаются по концентрическим окружностям равномерно, т.е. в порядке: 1 + 6 + 12 + 18 + 24 + 30 и т.д.

Пристеночный слой, обогащенный горючим, создается половиной расхода предпоследнего ряда двухкомпонентных форсунок в количестве n_1 , половина расхода которых "идет" в пристеночный слой. Для получения нужного соотношения компонентов в пристеночном слое x_{CT} на последней окружности возле стенки располагаются однокомпонентные форсунки горючего в количестве n_{CT}^r .



Пример разбивки потока продуктов сгорания в камере на участки при расчете смесеобразования

при наличии завесы охлаждения вне области головки с расходом \dot{m}_3 следует различать два соотношения компонентов в камере: α_r - соотношение компонентов только по головке и α_k - соотношение компонентов по камере в целом. Между α_r и α_k имеет место связь:

$$\alpha_r = \frac{\alpha_k}{1 - \bar{m}_3 (\alpha_k + 1)} ; \quad \alpha_k = \frac{\alpha_r}{1 + \frac{\bar{m}_3}{1 + \bar{m}_3} (\alpha_r + 1)} . \quad (3.5)$$

При проведении расчетов по разбивке расходов на головке полезно использовать равенства:

$$\dot{m}_K = \dot{m}_Я + \dot{m}_{CT} + \dot{m}_3 ; \quad 1 = \bar{m}_Я + \bar{m}_{CT} + \bar{m}_3 ; \quad (3.6)$$

Т а б л и ц а

Область потока	F_i , см^2	расходы					соотношение компонентов			теоретические значения			α_{\max}	α_1	α_2	α_{\min}	
		$O, \frac{\text{кг}}{\text{с}}$	$\Gamma, \frac{\text{кг}}{\text{с}}$	$\Sigma, \frac{\text{кг}}{\text{с}}$	\bar{m}	$g, \frac{\text{г}}{\text{см}^2}$	α_i	d_i	ψ_i	$\Gamma_{\text{тп}i}$	$C_{\text{тп}i}$	$K_{\text{тп}i}$					
камера	F_K	\dot{m}_K^O	\dot{m}_K^Γ	\dot{m}_K	1		α_K	d_K	ψ_K								
головка	F_H	\dot{m}_H^O	\dot{m}_H^Γ	\dot{m}_H	\bar{m}_H		α_H	d_H	ψ_H								
завеса	-	-	\dot{m}_3	\dot{m}_3	\bar{m}_3	-											
ядро	$F_Я$	$\dot{m}_Я^O$	$\dot{m}_Я^\Gamma$	$\dot{m}_Я$	$\bar{m}_Я$		$\alpha_Я$	$d_Я$	$\psi_Я$								
пристенки	F_{CT}	\dot{m}_{CT}^O	\dot{m}_{CT}^Γ	\dot{m}_{CT}	\bar{m}_{CT}		α_{CT}	d_{CT}	ψ_{CT}								
пристенки с завесой	F_{CT}	\dot{m}_{CT}^O	$(\dot{m}_{CT}^\Gamma)'$	\dot{m}_{CT}'	\bar{m}_{CT}'		α_{CT}'	d_{CT}'	ψ_{CT}'								

$$(\dot{m}_{CT}') = \dot{m}_{CT} + \dot{m}_3$$

$$\dot{m}_{CT}' = \dot{m}_{CT} + \dot{m}_3$$

$$\dot{m}_H = \dot{m}_K - \dot{m}_3$$

\dot{m}_3 - расход завесы не включенный в систему смешивания головки

Обычно: $F_H = F_K$; $\bar{m}_H + \bar{m}_3 = 1 = \bar{m}_Я + \bar{m}_{CT} + \bar{m}_3$
 $F_K = F_H + F_{CT}$

$$\alpha_H = \frac{\alpha_K}{1 - \bar{m}_3(\alpha_K + 1)} ; \quad \alpha_{CT}' = \frac{\alpha_{CT}}{1 + \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_{CT}}(\alpha_{CT} + 1)}$$

$$\alpha_K = \frac{\alpha_H}{1 + \frac{\dot{m}_3}{1 - \bar{m}_3}(\alpha_H + 1)} ; \quad \psi_{CT}' = \frac{\alpha_{CT}'}{\alpha_{CT} + 1}$$

При изменении:

$$\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{m}_i^O &= a \dot{m}_{iN}^O \\ \dot{m}_i^\Gamma &= b \dot{m}_{iN}^\Gamma \end{aligned} \right\} \alpha_i = \alpha_{iN} \frac{a}{b}$$

$$a = \frac{\alpha}{\alpha + 1} \cdot \frac{\alpha_N + 1}{\alpha_N}$$

$$b = \frac{\alpha_N + 1}{\alpha + 1}$$

$$\alpha_{\text{я}} = \frac{\alpha_{\text{к}} (\alpha_{\text{ст}} + 1) - \bar{m}_{\text{ст}} \alpha_{\text{ст}} (\alpha_{\text{к}} + 1)}{(\alpha_{\text{ст}} + 1) - \bar{m}_{\text{ст}} (\alpha_{\text{к}} + 1) - \bar{m}_3 (\alpha_{\text{к}} + 1) (\alpha_{\text{ст}} + 1)} ; \quad (3.7)$$

$$\alpha_{\text{к}} = \frac{\bar{m}_{\text{ст}} \alpha_{\text{ст}} (\alpha_{\text{я}} + 1) + (1 - \bar{m}_{\text{ст}} - \bar{m}_3) \alpha_{\text{я}} (\alpha_{\text{ст}} + 1)}{\bar{m}_{\text{ст}} (\alpha_{\text{я}} + 1) + (1 - \bar{m}_{\text{ст}} - \bar{m}_3) (\alpha_{\text{ст}} + 1) + \bar{m}_3 (\alpha_{\text{я}} + 1) (\alpha_{\text{ст}} + 1)} . \quad (3.8)$$

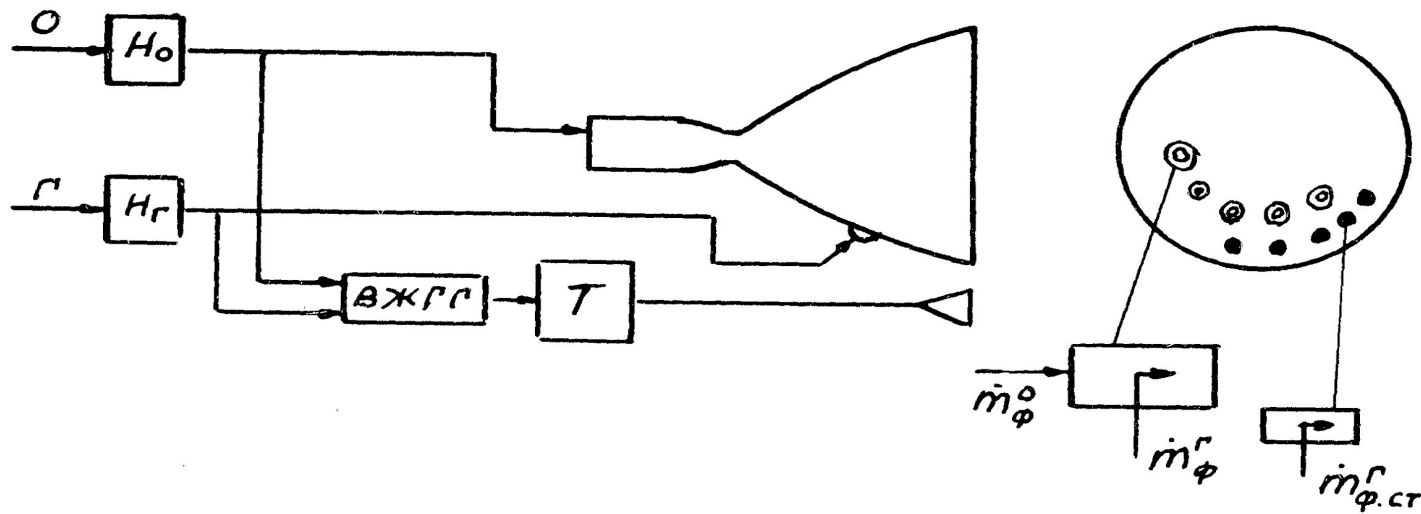
Проектируя смесительную головку и определяя расходы в слоях потока и через форсунки, необходимо, с одной стороны, добиваться меньшего разнообразия расходных характеристик форсунок горючего и окислителя – это упрощает технологию их изготовления и сборку головки. С другой стороны, после разбивки расходов надо оценить величины получающихся расходонапряженностей по камере сгорания, смесительной головке, пристеночному слою и ядру потока. Эти величины, соответственно, будут:

$$\delta_{\text{к}} = \frac{\dot{m}_{\text{к}}}{F_{\text{к}}} ; \quad \delta_{\text{г}} = \frac{\dot{m}_{\text{к}} - \dot{m}_3}{F_{\text{к}}} ; \quad \delta_{\text{ст}} = \frac{\dot{m}_{\text{ст}}}{F_{\text{ст}}} ; \quad \delta_{\text{я}} = \frac{\dot{m}_{\text{я}}}{F_{\text{я}}} , \quad (3.9)$$

где $F_{\text{к}} = F_{\text{г}} = F_{\text{ст}} + F_{\text{я}}$ – площади, соответственно, камеры сгорания, смесительной головки, пристеночного слоя и ядра потока.

Рассмотрим наиболее характерные примеры разбивки расходов компонентов.

$$\dot{m} = \dot{m}_K + \dot{m}_{\Gamma\Gamma}$$



Схемы двигателя без дожигания и смесительной головки с двухкомпонентными основными форсунками

$$\alpha = \frac{\alpha_K (\alpha_{\Gamma\Gamma} + 1) (1 - \bar{m}_{\Gamma\Gamma}) + \alpha_{\Gamma\Gamma} (\alpha_K + 1) \bar{m}_{\Gamma\Gamma}}{(\alpha_{\Gamma\Gamma} + 1) (1 - \bar{m}_{\Gamma\Gamma}) + (\alpha_K + 1) \bar{m}_{\Gamma\Gamma}} \quad (3.10)$$

Определяем расходы окислителя и горючего через двухкомпонентные форсунки:

$$\dot{m}_{\varphi}^O = \frac{\dot{m}_K^O}{\pi} = \frac{\alpha_K}{\alpha_K + 1} \frac{\dot{m}_K}{\pi}; \quad \dot{m}_{\varphi}^Г = \frac{\pi_{\varphi}^O}{\alpha_{\text{я}}} = \frac{\alpha_K}{(\alpha_K + 1) \alpha_{\text{я}}} \frac{\dot{m}_K}{\pi} \quad (3.11)$$

Расход горючего через специальные пристеночные однокомпонентные форсунки:

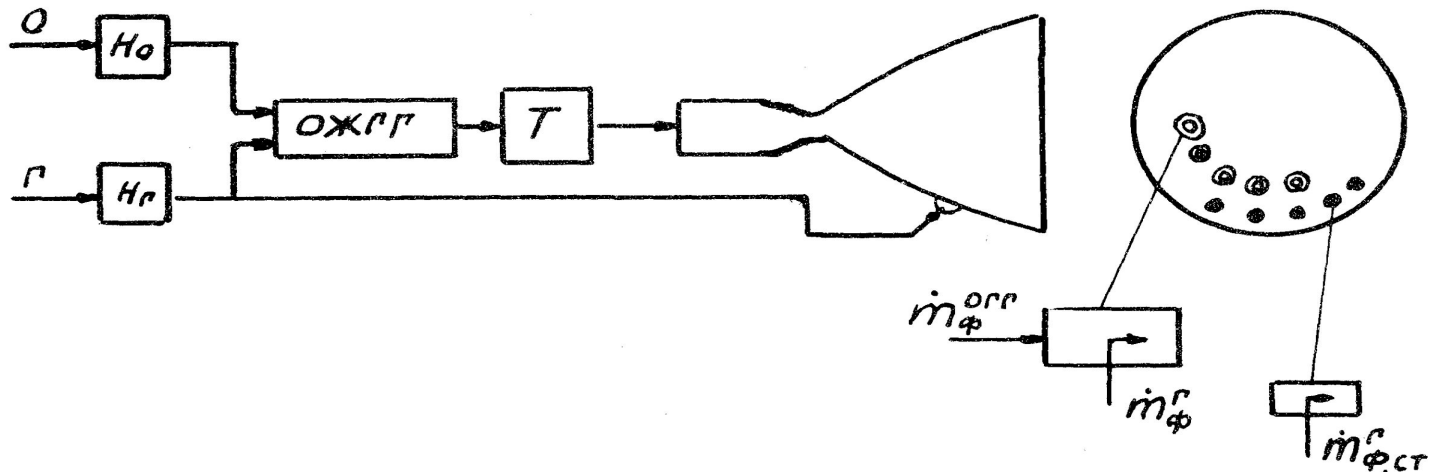
$$\dot{m}_{\varphi.СТ}^{\Gamma} = \frac{0,5 n_1 (\dot{m}_{\varphi}^0 - \dot{m}_{\varphi}^{\Gamma} \alpha_{СТ})}{n_{СТ} \alpha_{СТ}}. \quad (3.12)$$

Заметим, что значение $\alpha_{СТ}$ выбирается заранее исходя из требований теплозащиты стенки камеры.

Наконец, полные и относительные расходы, соответственно, в ядре и в пристеночной области будут:

$$\dot{m}_{Я} = (\dot{m}_{\varphi}^0 + \dot{m}_{\varphi}^{\Gamma})(n - 0,5 n_1); \quad \bar{m}_{Я} = \dot{m}_{Я} / \dot{m}_{К}; \quad (3.13)$$

$$\dot{m}_{СТ} = \dot{m}_{К} - \dot{m}_{Я} - \dot{m}_{З}; \quad \bar{m}_{СТ} = \dot{m}_{СТ} / \dot{m}_{К}; \quad \bar{m}_{З} = \dot{m}_{З} / \dot{m}_{К}.$$



Схемы двигателя с дожиганием окислительного генераторного газа и смесительной головки с двухкомпонентными газо-жидкостными основными форсунками

Определяем расход окислительного генераторного газа из ЖГГ

$\dot{m}_{огг}$

$$\dot{m}_{огг} = \frac{(\alpha_{огг} + 1) \alpha_{к}}{(\alpha_{к} + 1) \alpha_{огг}} \varphi_0 \dot{m}_{к}, \quad (3.14)$$

где $\varphi_0 = \dot{m}_{огг}^0 / \dot{m}_{к}^0$ - доля окислителя, поступающего в окислительный ЖГГ. В общем случае $0 < \varphi_0 \ll 1$.

Расход жидкого горючего, поступающего в камеру $\dot{m}_{кж}^{\Gamma}$ и далее в охлаждающий тракт, на завесу охлаждения и в форсуночную головку:

$$\dot{m}_{кж}^{\Gamma} = \frac{\alpha_{огг} - \alpha_{к} \psi_0}{(\alpha_{к} + 1) \alpha_{огг}} \dot{m}_{к} \quad (3.15)$$

Соотношение между газообразным компонентом – окислительным генераторным газом и жидким горючим:

$$\nu = \frac{\dot{m}_{огг}}{\dot{m}_{кж}^{\Gamma}} = \frac{(\alpha_{огг} + 1) \alpha_{к} \psi_0}{(\alpha_{огг} - \alpha_{к} \psi_0)} \quad (3.16)$$

Расход окислительного генераторного газа через двухкомпонентную форсунку $\dot{m}_{\varphi}^{огг}$ при числе n :

$$\dot{m}_{\varphi}^{огг} = \frac{\dot{m}_{огг}}{n} = \frac{(\alpha_{огг} + 1) \alpha_{к} \psi_0}{(\alpha_{к} + 1) \alpha_{огг}} \cdot \frac{\dot{m}_{к}}{n} \quad (3.17)$$

Расход жидкого горючего $\dot{m}_{кж}^{\Gamma}$, поступающего в камеру, распределяется между расходами через двухкомпонентные форсунки $\dot{m}_{\varphi}^{\Gamma}$, однокомпонентные пристеночные форсунки $\dot{m}_{\varphi.ст}^{\Gamma}$ и пояс завесы \dot{m}_3 :

$$\dot{m}_{кж}^{\Gamma} = \dot{m}_{\varphi}^{\Gamma} n + \dot{m}_{\varphi.ст}^{\Gamma} n_{ст} + \dot{m}_3 \quad (3.18)$$

Если принято соотношение компонентов в ядре потока, близкое к оптимальному $\alpha_{\text{я}}$, то расход жидкого горючего через двухкомпонентную форсунку должен быть:

$$\dot{m}_{\varphi}^{\Gamma} = \frac{\dot{m}_{\varphi}^{\text{огг}} (\alpha_{\text{огг}} - \alpha_{\text{я}})}{\alpha_{\text{я}} (\alpha_{\text{огг}} + 1)}. \quad (3.19)$$

Суммарный расход топлива через двухкомпонентную форсунку:

$$\dot{m}_{\varphi} = \dot{m}_{\varphi}^{\text{огг}} + \dot{m}_{\varphi}^{\Gamma}. \quad (3.20)$$

Приняв предварительно расход через завесу охлаждения, останется расход горючего через однокомпонентные форсунки пристеночного слоя:

$$\dot{m}_{\text{ст}}^{\Gamma} = \dot{m}_{\text{к}}^{\Gamma} - \dot{m}_{\text{з}}.$$

Наконец, находим либо соотношение в пристеночном слое:

$$\alpha_{\text{ст}} = \frac{0,5 \pi_1 \dot{m}_{\varphi}^{\text{огг}} \frac{\alpha_{\text{огг}}}{\alpha_{\text{огг}} + 1}}{\pi_{\text{ст}} \dot{m}_{\varphi, \text{ст}}^{\Gamma} + 0,5 \pi_1 \left(\dot{m}_{\varphi}^{\text{огг}} \frac{1}{\alpha_{\text{огг}} + 1} + \dot{m}_{\varphi}^{\Gamma} \right)}, \quad (3.21)$$

либо расход горючего через однокомпонентные пристеночные форсунки:

$$\dot{m}_{\varphi.ст}^{\Gamma} = \frac{0,5 n_1 \left(\dot{m}_{\varphi}^{огг} \frac{\alpha_{огг} - \alpha_{ст}}{\alpha_{огг} + 1} - \dot{m}_{\varphi}^{\Gamma} \alpha_{ст} \right)}{n_{ст} \alpha_{ст}}. \quad (3.22)$$

При получении удовлетворительных данных находим полные и относительные расходы в областях:

в ядре потока

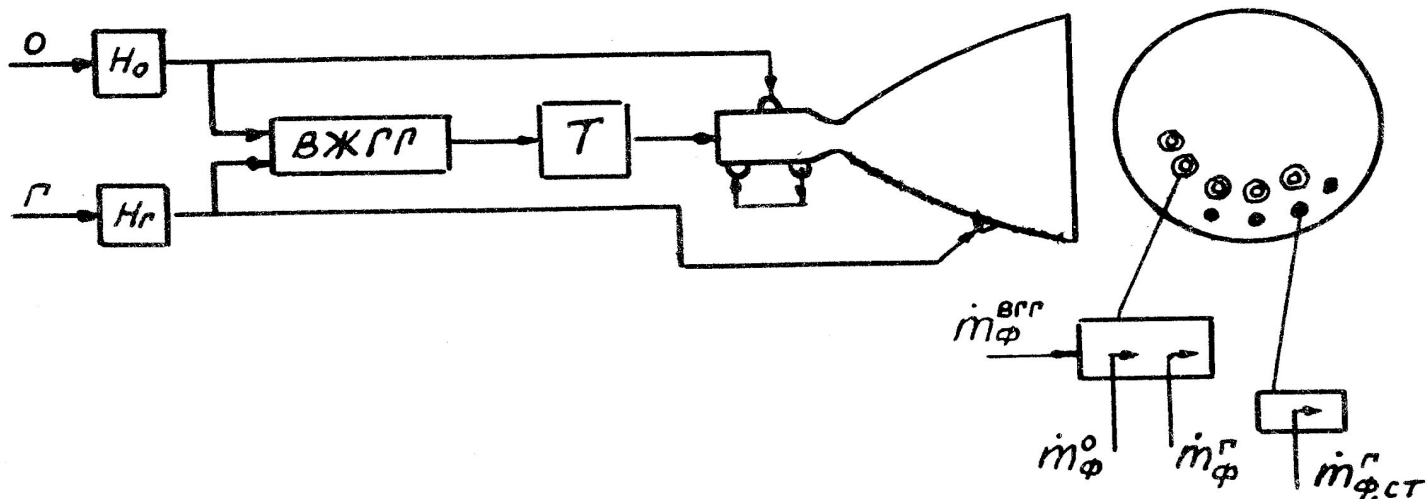
$$\dot{m}_я = (\dot{m}_{\varphi}^{огг} + \dot{m}_{\varphi}^{\Gamma}) (n - 0,5 n_1); \quad \bar{m}_я = \dot{m}_я / \dot{m}_к;$$

в пристеночном слое

$$\dot{m}_{ст} = (\dot{m}_{\varphi}^{огг} + \dot{m}_{\varphi}^{\Gamma}) 0,5 n_1 + \dot{m}_{\varphi.ст}^{\Gamma} n_{ст}; \quad \bar{m}_{ст} = \dot{m}_{ст} / \dot{m}_к;$$

$$(\dot{m}_{ст} = \dot{m}_к - \dot{m}_я - \dot{m}_з); \quad \bar{m}_з = \dot{m}_з / \dot{m}_к.$$

(3.23)



Схемы двигателя с дожиганием восстановительного генераторного газа и смесительной головки с двухкомпонентными трехрасходными газожидкостными основными форсунками

Видно из схемы двигателя, расход горючего - водорода - делится на расход, поступающий в ЖГГ и отдельно в камеру двигателя. Причем камера частично может охлаждаться окислителем - жидким кислородом.

В данной схеме двигателя на головке располагаются двухкомпонентные трехрасходные форсунки с расходами восстановительного газа, "чистого" горючего и "чистого" окислителя.

Соотношение компонентов в восстановительном газе $\alpha_{ВГГ}$, а секундный расход $\dot{m}_{ВГГ}$.

$$\dot{m}_{\text{ВГГ}} = \dot{m}_{\text{ВГГ}}^{\Gamma} (1 + \alpha_{\text{ВГГ}}) = \frac{\alpha_{\text{ВГГ}} + 1}{\alpha_{\text{К}} + 1} \varphi_{\Gamma} \dot{m}_{\text{К}}, \quad (3.24)$$

где $\varphi_{\Gamma} = \dot{m}_{\text{ВГГ}}^{\Gamma} / \dot{m}_{\text{К}}^{\Gamma}$ — доля горючего, поступающего в восстановительный ЖГГ. В общем случае $0 < \varphi_{\Gamma} \leq 1$.

Расход "жидкого" горючего, поступающего в камеру $\dot{m}_{\text{КЖ}}^{\Gamma}$ и далее в охлаждающий тракт, форсуночную головку и на завесу охлаждения:

$$\dot{m}_{\text{КЖ}}^{\Gamma} = \dot{m}_{\text{К}}^{\Gamma} - \dot{m}_{\text{ВГГ}}^{\Gamma} = \frac{1 - \varphi_{\Gamma}}{\alpha_{\text{К}} + 1} \dot{m}_{\text{К}}. \quad (3.25)$$

Расход восстановительного генераторного газа через двухкомпонентную форсунку $\dot{m}_{\varphi}^{\text{ВГГ}}$ при их числе n :

$$\dot{m}_{\varphi}^{\text{ВГГ}} = \frac{\dot{m}_{\text{ВГГ}}}{n} = \frac{\alpha_{\text{ВГГ}} + 1}{\alpha_{\text{К}} + 1} \frac{\varphi_{\Gamma} \dot{m}_{\text{К}}}{n}. \quad (3.26)$$

Расход "чистого" окислителя, поступающего в камеру $\dot{m}_{\text{КЖ}}^0$ и далее в охлаждающий тракт и полость форсуночной головки:

$$\dot{m}_{\text{КЖ}}^0 = \dot{m}_{\text{К}}^0 - \dot{m}_{\text{ВГГ}}^0 = \frac{\alpha_{\text{К}} - \alpha_{\text{ВГГ}} \varphi_{\Gamma}}{\alpha_{\text{К}} + 1} \dot{m}_{\text{К}}. \quad (3.27)$$

Расход "чистого" окислителя через двухкомпонентную форсунку при их числе n :

$$\dot{m}_{\Phi}^0 = \frac{\dot{m}_{\kappa\lambda}^0}{n} = \frac{\alpha_{\kappa} - \alpha_{\text{ВГГ}} \psi_{\Gamma}}{\alpha_{\kappa} + 1} \cdot \frac{\dot{m}_{\kappa}}{n}. \quad (3.28)$$

Расход "чистого" горючего, поступающего в камеру, распределяется между двухкомпонентными и однокомпонентными форсунками и завесой:

$$\dot{m}_{\kappa\lambda}^{\Gamma} = \dot{m}_{\Phi}^{\Gamma} \cdot n + \dot{m}_{\Phi.\text{СТ}}^{\Gamma} n_{\text{СТ}} + \dot{m}_{\text{З}}. \quad (3.29)$$

Если задать соотношение компонентов в ядре потока, которое желательно иметь близким к оптимальному значению $\alpha_{\text{Я}}$, то расход горючего через двухкомпонентные трехрасходные форсунки

$$\dot{m}_{\Phi}^{\Gamma} = \frac{(\alpha_{\kappa} - \alpha_{\text{Я}} \psi_{\Gamma})}{(\alpha_{\kappa} + 1) \alpha_{\text{Я}}} \cdot \frac{\dot{m}_{\kappa}}{n}. \quad (3.30)$$

Суммарный расход трех компонентов через одну двухкомпонентную форсунку:

$$\dot{m}_{\Phi} = \dot{m}_{\Phi}^{\text{ВГГ}} + \dot{m}_{\Phi}^0 + \dot{m}_{\Phi}^{\Gamma} = \frac{(\alpha_{\text{Я}} + 1) \alpha_{\kappa}}{(\alpha_{\kappa} + 1) \alpha_{\text{Я}}} \cdot \frac{\dot{m}_{\kappa}}{n}. \quad (3.31)$$

Наконец, определяем либо соотношение в пристеночном слое:

$$\alpha_{CT} = \frac{0,5 n_1 (\dot{m}_\Phi^{BГГ} \frac{\alpha_{BГГ}}{\alpha_{BГГ} + 1} + \dot{m}_\Phi^0)}{\dot{m}_{\Phi.CT}^\Gamma n_{CT} + 0,5 n_1 (\dot{m}_\Phi^{BГГ} \frac{1}{\alpha_{BГГ} + 1} + \dot{m}_\Phi^\Gamma)}, \quad (3.32)$$

либо находим необходимый расход горючего через однокомпонентную пристеночную форсунку:

$$\dot{m}_{\Phi.CT}^\Gamma = \frac{0,5 n_1 (\dot{m}_\Phi^{BГГ} \frac{\alpha_{BГГ} - \alpha_{CT}}{\alpha_{BГГ} + 1} + \dot{m}_\Phi^0 + \dot{m}_\Phi^\Gamma \alpha_{CT})}{n_{CT} \alpha_{CT}}. \quad (3.33)$$

Естественно, если какие-либо параметры оказались не удовлетворительными, придется все пересчитать, изменив несколько исходные данные, например, α_K , α_Γ , α_{CT} или соответствующие расходы в слоях.

После получения удовлетворительных параметров находим полные и относительные расходы в слоях потока:

в ядре потока

$$\dot{m}_\Gamma = \dot{m}_\Phi (n - 0,5 n_1); \quad \bar{m}_\Gamma = \dot{m}_\Gamma / \dot{m}_K;$$

в пристеночном слое

$$\dot{m}_{CT} = 0,5 n_1 \dot{m}_\Phi + n_{CT} \dot{m}_{\Phi.CT}^\Gamma = \dot{m}_K - \dot{m}_\Gamma - \dot{m}_3;$$

$$\bar{m}_{CT} = \dot{m}_{CT} / \dot{m}_K.$$

(3.34)