

УДК 629.001.036.5.621.22.01

МЕТОД ПРОЕКТНОГО РАСЧЕТА ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СТРУЙНОЙ ГАЗОЖИДКОСТНОЙ ФОРСУНКИ С ВНУТРЕННИМ СМЕШЕНИЕМ

© 2011 В. С. Егорычев

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Представлен метод проектного расчета двухкомпонентной струйной газожидкостной форсунки с внутренним смешением.

Метод, форсунка, двухкомпонентная форсунка, струйная газожидкостная форсунка, жидкостный ракетный двигатель, смесеобразование, топливо, окислитель, горючее.

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

Расчетная схема двухкомпонентной струйной газожидкостной форсунки с внутренним смешением приведена на рис. 1.

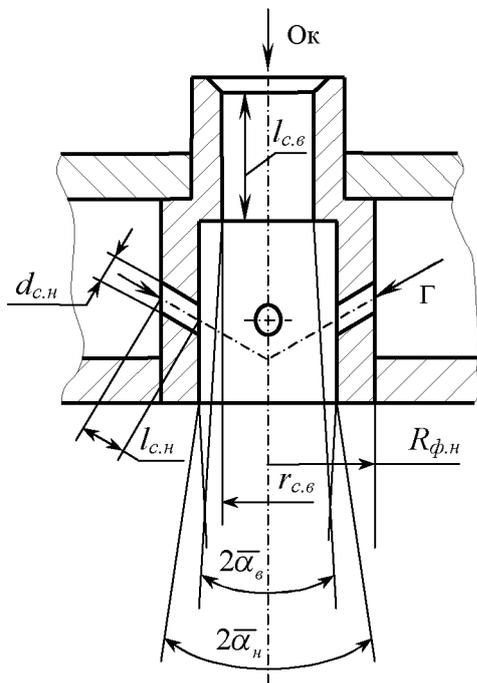


Рис. 1. Расчетная схема двухкомпонентной струйно-струйной газожидкостной форсунки с внутренним смешением

Форсунка состоит из наружного и внутреннего контуров. Внутренний контур представляет собой однокомпонентную струйную газовую форсунку окислителя или окислительного генераторного газа. Наружный контур – однокомпонентную струйную

жидкостную форсунку (или форсунки) горючего. Смешение газового окислителя и жидкого горючего начинается уже внутри двухкомпонентной форсунки. Из сопла форсунки вытекает газожидкостная струя топливной смеси.

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

Проектный расчет двухкомпонентной струйной газожидкостной форсунки с внутренним смешением проводится в следующей последовательности.

1. Рассчитывается внутренний контур двухкомпонентной форсунки, представляющий собой однокомпонентную струйную газовую форсунку окислителя, подающую в камеру сгорания газообразный окислитель или окислительный генераторный газ.

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

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

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

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

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...3,0 мм, а рас-

стояние между днищами составляет 8...12 мм [1].

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.

1.4. Находится относительная длина струйной форсунки, т.е. отношение $l_{c.в}/d_{c.в}$.

1.5. Площадь сопла форсунки на выходе

$$F_{\phi.в} = \frac{\pi d_{c.в}^2}{4}. \quad (1)$$

1.6. Число Рейнольдса на выходе из форсунки

$$Re = \frac{4 \dot{m}_{\phi.ок}}{\pi \eta_{гр} d_{c.в}}, \quad (2)$$

где $\dot{m}_{\phi.ок}$ – массовый расход окислителя или окислительного генераторного газа через одну форсунку; $\eta_{гр}$ – динамическая вязкость газа, подаваемого через форсунку, при температуре на входе в форсунку. В расчёте можно использовать температуру генераторного газа за турбиной.

1.7. Среднее значение скорости генераторного газа на выходе из форсунки

$$W_{гр} = \frac{\dot{m}_{\phi.ок}}{\rho_{гр} F_{\phi.в}}, \quad (3)$$

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

1.8. Коэффициент расхода форсунки

$$\mu = \left(1,23 + \frac{58 l_{c.в}}{Re d_{c.в}} \mu \right)^{-1}. \quad (4)$$

Решая это уравнение, получим

$$\mu = \frac{\sqrt{1,23^2 + 232 l_{c.в}/Re d_{c.в}} - 1,23}{116 l_{c.в}/Re d_{c.в}}. \quad (5)$$

1.9. Давление генераторного газа на входе в форсунку

$$p_{ex} = p_k + \Delta p_{\phi.в}, \quad (6)$$

где p_k – давление на входе в камеру сгорания; $\Delta p_{\phi.в}$ – перепад давления на внутреннем контуре двухкомпонентной форсунки или струйной газовой форсунке окислителя.

1.10. Плотность генераторного газа на входе в форсунку

$$\rho_{гр} = \frac{p_{ex}}{R_{гр} T_{ex}}, \quad (7)$$

где T_{ex} – температура генераторного газа на входе в форсунку.

1.11. Площадь сопла форсунки на выходе

$$F_{\phi.в} = \frac{\dot{m}_{\phi.ок}}{\mu \rho_{гр} \left(\frac{p_k}{p_{ex}} \right)^{\frac{1}{n}} \sqrt{2 \frac{n}{n-1} R_{гр} T_{ex} \left[1 - \left(\frac{p_k}{p_{ex}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]}}}. \quad (8)$$

1.12. Диаметр сопла форсунки, обеспечивающий требуемый массовый расход окислительного генераторного газа или газообразного окислителя при выбранном перепаде давления на форсунке $\Delta p_{\phi.в}$:

$$d_{c.в} = \sqrt{\frac{4 F_{\phi.в}}{\pi}}. \quad (9)$$

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

При отличии значений диаметров менее 1% расчёт прекращается.

2. Рассчитывается наружный контур двухкомпонентной форсунки, представляющий собой однокомпонентную струйную жидкостную форсунку горючего.

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

$$\dot{m}_{1\phi.г} = \frac{\dot{m}_{\phi.г}}{n_{\phi}}, \quad (10)$$

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

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

Этот диаметр может находиться в пределах $0,2 \text{ мм} \leq d_{с.н} \leq \frac{H}{2}$, где H – расстояние

между средним и огневым днищами смесительной головки [1]. 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 обусловлен конструкцией смесительной головки камеры и толщиной распыла компонента.

2.2. Определяется в первом приближении длина струйной жидкостной форсунки или длина сопла форсунки $l_{сн}$.

Форсунка подаёт жидкое горючее из полости смесительной головки, расположенной между средним и огневым днищами. Длина форсунки определяется толщиной стенки наружного контура и углом наклона оси жидкостной форсунки к оси газовой форсунки окислителя.

2.3. 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.

2.4. Находится относительная длина форсунки или сопла форсунки, т. е. отношение $\frac{l_{сн}}{d_{сн}}$.

2.5. Определяется режим работы струйной жидкостной форсунки.

У струйных форсунок с острой входной кромкой при $\frac{l_{сн}}{d_{сн}} > 1,5$ возможна реализация следующих режимов работы:

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

сти из струйной форсунки имеет вид неравенства

$$k \leq k_{кр}, \quad (11)$$

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 $\frac{l_{сн}}{d_{сн}} < 1,5$, возможна реализация следующих режимов работы:

- неустойчивый режим истечения в широком диапазоне чисел Рейнольдса ($Re = 10^3 \dots 10^5$). Неустойчивость течения объясняется различной степенью замыкания вихревой области на стенке, которая обусловлена рядом случайных причин;
- отрывный режим истечения.

Величина $\Delta p_{отр}$ зависит от относительной длины форсунки. Очевидно, что $\Delta p_{отр}$ возрастает с её повышением. Увеличить $\Delta p_{отр}$ при $p_k = \text{const}$ и $\frac{l_{сн}}{d_{сн}} = \text{const}$

можно также округлением входной кромки. Чем больше радиус округления входной кромки и чем длиннее канал при постоянном диаметре сопла, тем больше $\Delta p_{отр}$. 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 входной кромкой, имеющих $\frac{l_{сн}}{d_{сн}} < 1,5$, является неблагоприятным для двигателя из-за значительного колебания коэффициента расхода.

Кавитационный режим истечения у форсунок с острой входной кромкой при $\frac{l_{сн}}{d_{сн}} > 1,5$ является тоже нежелательным, т.к. вызывает неустойчивость рабочего процесса

двигателя. Поэтому и от кавитационных режимов следует отказаться.

2.6. Площадь сопла струйной жидкостной форсунки

$$F_{\phi_n} = \frac{\pi d_{сн}^2}{4}. \quad (12)$$

2.7. Число Рейнольдса

$$Re = \frac{4\dot{m}_{1\phi_r}}{\pi \eta_r d_{сн}}, \quad (13)$$

где η_r – динамическая вязкость жидкого горючего при температуре на входе в форсунку; $\dot{m}_{1\phi_r}$ – массовый расход горючего через форсунку.

2.8. Среднее значение скорости компонента на выходе из форсунки

$$W = \frac{\dot{m}_{\phi_r}}{\rho_r F_{\phi_n}}, \quad (14)$$

где ρ_r – плотность горючего при температуре на входе в форсунку.

2.9. Коэффициент расхода форсунки μ :

✓ для безотрывного режима истечения

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{K + \lambda \frac{l}{d_{сн}}}}, \quad (15)$$

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

2.9.1. Коэффициент линейного гидравлического сопротивления форсунки λ :

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

$$\lambda = \frac{64}{Re}; \quad (16)$$

➤ переходном и турбулентном – эмпирической зависимостью Блазиуса

$$\lambda = 0,3164 \cdot Re^{-0,25}; \quad (17)$$

➤ турбулентном течении компонента, когда $Re > 10000$, $\lambda = 0,031$.

2.9.2. Потери на входе струйной форсунки K :

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

$$K = 2,2 - 0,726 \cdot \exp(-74,5 \frac{\eta_r l_{сн}}{\dot{m}_{1\phi_r}}), \quad (18)$$

где η_r – динамическая вязкость жидкого горючего, подаваемого через форсунку в Па·с; $l_{сн}$ – длина форсунки в м; $\dot{m}_{1\phi_r}$ – массовый расход горючего через форсунку в кг/с;

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

$$K = 1 + 2,65 \cdot \lambda. \quad (19)$$

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

✓ Для кавитационного режима истечения компонента

$$\mu = \varepsilon \sqrt{1 + \kappa} = \varepsilon \sqrt{1 + \frac{p_{к} - p_{н}}{\Delta p_{\phi}}}, \quad (20)$$

где ε – коэффициент сжатия струи в самом узком её сечении.

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

В первой итерации перепад давления на форсунке берётся из рекомендованного интервала [1]

$$\Delta p_{\phi} = 0,3 \dots 1,5 \text{ МПа}. \quad (21)$$

2.10. Действительный перепад давления на струйной жидкостной форсунке горючего, обеспечивающий требуемый расход компонента топлива через форсунку:

$$\Delta p_{\phi} = \frac{\dot{m}_{1\phi_r}}{2 \rho_r \mu^2 F_{\phi_n}^2}, \quad (22)$$

где ρ_r – плотность жидкого горючего при температуре на входе в форсунку.

Полученный перепад давления на форсунке Δp_{ϕ} не должен выходить за пределы рекомендованного диапазона (21). Если это не выполняется, то необходимо изменить диаметр сопла форсунки $d_{сн}$, принятый в первом приближении. Более точное значение диаметр сопла форсунки 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 $D_{к}$.

3. Определяется минимальная площадь сопла двухкомпонентной форсунки на выходе, обеспечивающая независимую друг от

друга работу и расчёт внутреннего и наружного контуров:

$$F_{\dot{\phi}} = F_{\dot{\phi}_a} + F_{\dot{\phi}_n} = F_{\dot{\phi}_a} + \frac{\dot{m}_{\dot{\phi}_r}}{\rho_r W}, \quad (23)$$

где $\dot{m}_{\dot{\phi}_r}$ – массовый расход жидкого горючего через наружный контур двухкомпонентной форсунки; ρ_r – плотность жидкого горючего при температуре на входе в форсунку.

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

$$\rho_r = \frac{P_k}{R_r T_{ax\dot{\phi}_r}}. \quad (24)$$

Минимальный диаметр сопла двухкомпонентной форсунки на выходе, обеспечивающий независимую друг от друга работу и расчёт внутреннего и наружного контуров:

$$d_{c\dot{\phi}} = \sqrt{\frac{4F_{\dot{\phi}}}{\pi}}. \quad (25)$$

После определения всех проектных параметров вычерчивается конструктивная схема форсунки и выполняется её рабочий чертёж.

Библиографический список

1. Добровольский, М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования: учеб. для вузов [Текст] / М.В. Добровольский; под ред. Д.А. Ягодникова.– 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.– 488 с.
2. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей [Текст]/ А.П. Васильев, М.В. Кудрявцев, В.А. Кузнецов [и др.]; под ред. В.М. Кудрявцева.– М.: Высш. шк. 1993.
3. Сточек, Н.П. Гидравлика жидкостных ракетных двигателей [Текст] / Н.П. Сточек, А.С. Шапиро – М.: Машиностроение, 1978.– 128 с.

METHOD OF DESIGN CALCULATION GAS-LIQUID JET DUPLEX FUEL NOZZLE WITH INTERNAL MIXING

© 2011 V. S. Egorychev

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

Developed a method calculation of gas-liquid jet duplex fuel nozzle with internal mixing them any design concept. Expressions are obtained for determining the coefficient of discharge jet fuel nozzles on all possible modes of operation to the actual flow of the fuel components. This allows the required accuracy for practical purposes to calculate all required parameters of the projected duplex fuel nozzle.

Method, fuel nozzle, duplex fuel nozzle, jet gas-liquid fuel nozzle, liquid-fuel rocket engine, carburetion, fuel, oxidizer, propellant.

Информация об авторах

Егорычев Виталий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 334-72-00. Область научных интересов: рабочие процессы жидкостных ракетных двигателей малой тяги, термодинамика тела переменных массы и состава, неравновесная термодинамика.

Egorychev Vitaliy Sergeevich, Candidate of Technical Science, associate professor of aircraft engines theory department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 334-72-00. Area of research: small-thrust liquid-propellant rocket engines operation, variable-mass and variable-composition body thermodynamic, nonequilibrium thermodynamic.