

УДК 629.001.036.5.621.22.01

МЕТОД ПРОЕКТНОГО РАСЧЕТА ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СТРУЙНО-ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ГАЗОЖИДКОСТНОЙ ФОРСУНКИ С ВНУТРЕННИМ СМЕШЕНИЕМ

© 2011 В. С. Егорычев

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

Разработан метод проектного расчета двухкомпонентной струйно-центробежной газожидкостной форсунки с внутренним смешением по обобщенной расчетной схеме. Полученные выражения позволяют определить коэффициент расхода центробежной форсунки, принимая во внимание реальный расход топливных компонентов. Минимальный диаметр на выходе двухкомпонентной форсунки обеспечивает независимую друг от друга работу и расчеты внутреннего и внешнего контуров. Это позволяет с необходимой точностью определять все необходимые параметры спроектированной двухкомпонентной форсунки.

Метод, форсунка, двухкомпонентная форсунка, струйно-центробежная газожидкостная форсунка, жидкостный ракетный двигатель, смесеобразование, топливо, окислитель, горючее.

Двухкомпонентные струйно-центробежные газожидкостные форсунки с внутренним смешением широко используются в ЖРД с дожиганием генераторного газа 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. 1.

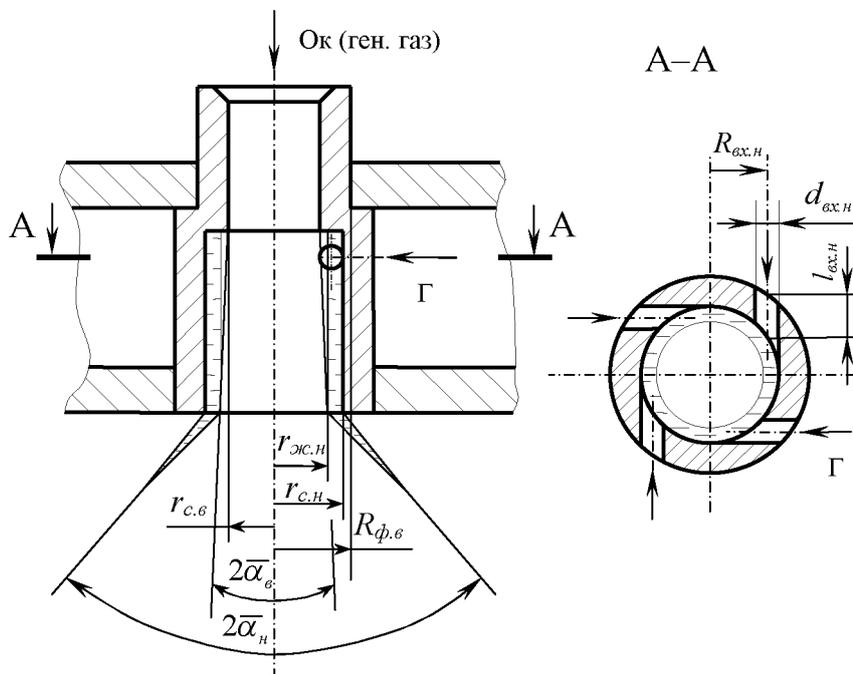


Рис. 1. Расчётная схема двухкомпонентной струйно-центробежной газожидкостной форсунки с внутренним смешением

Форсунка состоит из наружного и внутреннего контуров. Внутренний контур представляет собой однокомпонентную

струйную газовую форсунку окислителя или окислительного генераторного газа. Наружный контур представляет собой однокомпо-

нентную центробежную жидкостную форсунку горючего. Смешение газового окислителя и жидкого горючего начинается уже внутри двухкомпонентной форсунки.

Оба контура двухкомпонентной форсунки работают и рассчитываются независимо друг от друга.

Проектный расчёт такой двухкомпонентной струйно-центробежной 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 $d_{c.в}$.

Этот диаметр может находиться в пределах $0,5 \text{ мм} \leq d_{c.в} \leq D_{ф.в}$. В первой итерации его можно принять равным 4...6 мм.

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

Газовая струйная форсунка подаёт газообразный окислитель или окислительный генераторный газ из полости смесительной головки, расположенной между средним и наружным днищами. Поэтому при определении её длины следует учитывать толщину среднего днища и величину выступа форсунки над средним днищем.

Толщина среднего днища находится в интервале 2,0...3,0 мм, а расстояние между средним и огневым 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:

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

1.6. Число Рейнольдса на выходе из форсунки

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

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

1.7. Среднее значение скорости газообразного окислителя или генераторного газа на выходе из форсунки

$$W = \frac{\dot{m}_{ф.ок}}{\rho F_{ф.в}}, \quad (3)$$

где ρ – плотность 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

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

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

1.10. Плотность генераторного газа или газообразного окислителя на входе в форсунку

$$\rho = \frac{p_{ex}}{RT_{ex}}, \quad (7)$$

где T_{ex} – температура генераторного газа на входе в форсунку, R – газовая постоянная этого газа.

1.11. Площадь сопла форсунки на выходе

$$F_{\phi\epsilon} = \frac{\dot{m}_{\phi\text{ок}}}{\mu\rho \left(\frac{p_{\kappa}}{p_{\text{ex}}}\right)^{\frac{1}{n}} \sqrt{2 \frac{n}{n-1} RT_{\text{ax}} \left[1 - \left(\frac{p_{\kappa}}{p_{\text{ex}}}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right]}}. \quad (8)$$

1.12. Диаметр сопла форсунки, обеспечивающий требуемый массовый расход окислительного генераторного газа или газообразного окислителя при выбранном перепаде давления на форсунке,

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

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 центробежную жидкостную форсунку горючего.

2.1. Задаются числом входных тангенциальных отверстий $i_{\text{ex.n}}$.

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

2.2. Задаются диаметром входного тангенциального отверстия $d_{\text{ex.n}}$.

Рекомендуемый диапазон диаметров $d_{\text{ex.n}} = 0,5 \dots 2,5$ мм [1].

Число тангенциальных отверстий $i_{\text{ex.n}}$ и их диаметр $d_{\text{ex.n}}$ необходимо увязать между собой таким образом, чтобы в одном уровне не было перекрытия соседних тангенциальных отверстий и струи горючего закручивались в вихревой камере форсунки, не распаваясь на капли.

2.3. Находится диаметр камеры закручивания форсунки $D_{\text{к.з.н}}$ по известному наружному диаметру внутреннего контура двухкомпонентной струйно-центробежной форсунки $D_{\phi\epsilon}$:

$$D_{\text{к.з.н}} \geq D_{\phi\epsilon} + 2d_{\text{ex.n}}, \quad (10)$$

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

2.4. На чертеже в поперечном сечении форсунки замеряется длина входного тангенциального отверстия $l_{\text{ex.n}}$ (см. рис. 1).

2.5. Определяется отношение $l_{\text{ex.n}}/d_{\text{ex.n}}$.

Оно должно быть в интервале от 1,5 до 6,0. [2]. Если полученное значение $l_{\text{ex.n}}/d_{\text{ex.n}}$ выходит за указанный интервал, то необходимо скорректировать соответствующим образом $D_{\text{к.з.н}}$, $d_{\text{ex.n}}$ или $D_{\phi\epsilon}$.

2.6. Длина камеры закручивания центробежной форсунки горючего

$$l_{\text{к.з.н}} = \bar{l}_{\text{к.з.н}} \cdot D_{\text{к.з.н}}, \quad (11)$$

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

Относительная длина камеры закручивания должна находиться в пределах 0,5...3,0 [1].

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 днища находится в интервале 2,0...3,0 мм, а расстояние между огневым и средним днищами составляет 8...12 мм [1].

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

$$R_{\text{ex.n}} = R_{\text{к.з.н}} - r_{\text{ex.n}}. \quad (12)$$

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

Для форсунки открытого типа $d_{\text{с.н}} = D_{\text{к.з.н}}$, а закрытого типа $d_{\text{с.н}} < D_{\text{к.з.н}}$.

В приведённой расчётной схеме двухкомпонентной струйно-центробежной форсунки (см. рис. 1) применяют центробежную форсунку открытого типа.

При проектировании форсунки необходимо учитывать, что отношение $R_{\text{ex.n}}/r_{\text{с.н}}$

должно быть в пределах 1...25, а отношение $d_{с.н}/D_{к.з.н} = 0,2...1,0$ [2].

2.9. Выбирается длина сопла форсунки $l_{с.н}$:

$$l_{с.н} = \bar{l}_{с.н} d_{с.н}. \quad (13)$$

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

2.10. Геометрическая характеристика центробежной форсунки горючего

$$A = \frac{R_{ах.н} r_{с.н}}{i_{ах.н} r_{ах.н}^2}. \quad (14)$$

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

$$A = \frac{R_{ах.н} r_{с.н}}{i_{ах.н} r_{ах.н}^2} \sin \theta, \quad (15)$$

где θ – угол между осью входного тангенциального отверстия и направлением оси двухкомпонентной форсунки.

2.11. Число Рейнольдса на входе в форсунку

$$Re_{ах} = \frac{4 \dot{m}_{ф.г}}{\pi \eta_{г} d_{ах.н} \sqrt{i_{ах.н}}}, \quad (16)$$

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

2.12. Коэффициент трения при условии на входе в форсунку λ определяется с помощью эмпирической зависимости

$$\lg \lambda = \frac{25,8}{(\lg Re_{ах})^{2,58}} - 2. \quad (17)$$

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

$$A_3 = \frac{A}{1 + \frac{\lambda}{2} R_{ах.н} (R_{ах.н} + d_{ах.н} - r_{с.н})}, \quad (18)$$

где λ – коэффициент трения, определяемый при условии на входе в форсунку.

2.14. Коэффициент живого сечения сопла форсунки $\varphi = 1 - \frac{r_{ж.н}^2}{r_{с.н}^2}$

$$\varphi = \frac{1}{\left(\sqrt[3]{\frac{A_3}{2\sqrt{2}} + \sqrt{\frac{A_3^2}{8} - \frac{1}{27}}} + \sqrt[3]{\frac{A_3}{2\sqrt{2}} - \sqrt{\frac{A_3^2}{8} - \frac{1}{27}}} \right)^2}. \quad (19)$$

2.15. Коэффициент расхода центробежной форсунки горючего

$$\mu = \varphi \sqrt{\frac{\varphi}{2 - \varphi}}. \quad (20)$$

2.16. Средний угол факела распыла

$$\operatorname{tg} \bar{\alpha} = \frac{2\mu A_3}{\sqrt{(1 + \sqrt{1 - \varphi})^2 - 4\mu^2 A_3^2}}. \quad (21)$$

Для контроля правильности расчётов и принятия дальнейших проектных решений в [2] представлены графики зависимостей коэффициентов живого сечения φ , расхода μ и среднего угла факела распыла $2\bar{\alpha}$ от действительной геометрической характеристики центробежной форсунки A или эквивалентной – A_3 .

2.17. Площадь сопла форсунки

$$F_{ф.н} = \frac{\pi d_{с.н}^2}{4}. \quad (22)$$

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

$$\Delta p_{ф.г} = \frac{\dot{m}_{ф.г}^2}{2\rho_{г} \mu^2 F_{ф.н}^2}, \quad (23)$$

где $\rho_{г}$ – плотность жидкого горючего перед форсункой.

Полученный перепад давления на форсунке $\Delta p_{ф.г}$ не должен выходить за пределы рекомендованного интервала $\Delta p_{ф.г} = 0,3...1,5$ МПа [2] или должен быть равен заданному перепаду. Если это не выполняется, то необходимо изменить $d_{с.н}$, принятый в первом приближении. Более точное значение $d_{с.н}$ для следующей итерации можно получить, используя уравнение (23), 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 тангенциально-

го отверстия $d_{\text{ex.n}}$ и их число $i_{\text{ex.n}}$. В крайнем случае, можно изменить число форсунок n , схему их расположения на смесительной головке, внешний диаметр форсунки $D_{\text{ф}}$ или даже диаметр камеры сгорания на входе $D_{\text{к}}$. Может быть, придется изменить и принятый ранее тип форсуночной головки.

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

$$r_{\text{жс.н}} = r_{\text{с.н}} \sqrt{1 - \varphi}. \quad (24)$$

2.20. Площадь живого сечения сопла форсунки

$$F_{\text{жс.н}} = \varphi F_{\text{с.н}}. \quad (25)$$

2.21. Среднее значение осевой скорости горючего на выходе из форсунки

$$W_a = \frac{\dot{m}_{\text{ф.г}}}{\rho_{\text{г}} F_{\text{жс.н}}}. \quad (26)$$

2.22. Среднее значение абсолютной скорости горючего на выходе из форсунки

$$W = \frac{W_a}{\cos \bar{\alpha}}. \quad (27)$$

2.23. Толщина пелены горючего на выходе из форсунки

$$\delta_n = r_{\text{с.н}} - r_{\text{жс.н}}. \quad (28)$$

2.24. Критерий Вебера

$$We = \frac{\rho_{\text{к}} W^2 d_{\text{с.н}}}{\sigma_{\text{г}}}, \quad (29)$$

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.

2.25. Критерий Лапласа

$$L_p = \frac{\rho_{\text{жс}} \delta_n \sigma_{\text{г}}}{\eta_{\text{г}}}, \quad (30)$$

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

2.26. Медианный диаметр образовавшихся капель в факеле распыла форсунки

$$d_m = 269 L_p^{-0,35} \left(\frac{We \rho_{\text{к}}}{\rho_{\text{жс}}} \right)^{-0,483}. \quad (31)$$

В качестве дополнительных критериев оценки правильности спроектированной форсунки (целевой функции) могут использоваться величина среднего угла факела рас-

пыла $2\bar{\alpha}$ или тонкость распыла, оцениваемая медианным диаметром образовавшихся капель d_m .

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

1. Струя генераторного газа, вытекающая из внутреннего контура в камеру закручивания наружного контура, не 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

$$d_{\text{с.г}} \leq D_{\text{к.з.н}} - 2d_{\text{вх.н}}, \quad (32)$$

где $D_{\text{к.з.н}}$ и $d_{\text{вх.н}}$ – диаметры камеры закручивания и входного тангенциального отверстия наружного контура форсунки соответственно (см. рис.1).

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

$$d_{\text{с.г}} = d_{\text{жс.н}} - 2 \frac{l_{\text{к.з.н}}}{\cos \bar{\alpha}_g}, \quad (33)$$

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

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

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.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки), на основании постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010.

Библиографический список

1. Добровольский, М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования [Текст]: учебник для вузов.– 2-е изд., перераб. и доп. / М.В. Добровольский; под ред.

Д.А. Ягодникова.– 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 JET-CENTRIFUGAL GAS-LIQUID 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 of design calculation jet-centrifugal gas-liquid duplex fuel nozzle with internal mixing of the generalized structural scheme. Expressions are obtained for determining the coefficient of discharge of the centrifugal fuel nozzle, taking into account the real flow of the fuel components. To a minimum diameter nozzle at the outlet duplex fuel nozzle, which provides independent from each other work and the calculation of internal and external contours. 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-centrifugal 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 ЖРДМТ, термодинамика тел переменных массы и состава, неравновесная термодинамика.

Egorychev Vitaliy Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, 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 thermodynamics, nonequilibrium thermodynamics.