

МЕТОД ПРОЕКТНОГО РАСЧЕТА ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ЭМУЛЬСИОННОЙ ФОРСУНКИ

© 2009 В. С. Егорычев

Самарский государственный аэрокосмический университет

Представлены методика и результаты уточненного расчета двухкомпонентной центробежной эмульсионной форсунки с учётом влияния конкретных конструктивных особенностей.

Форсунка, двухкомпонентная эмульсионная форсунка, жидкостный ракетный двигатель, смешение, топливо, окислитель, горючее, метод

В двухкомпонентных центробежных форсунках с внутренним смешением перемешивание компонентов топлива происходит в камере закручивания наружного контура форсунки. Окислитель и горючее образуют внутри форсунки эмульсионную смесь, которая поступает в камеру сгорания. Такие эмульсионные форсунки нашли широкое распространение в смесительных головках современных ЖРД, работающих на несамовоспламеняющихся компонентах топлива.

Общего метода расчета таких форсунок пока не создано. Постараемся устранить имеющийся пробел.

Расчетная схема двухкомпонентной центробежной эмульсионной форсунки приведена на рис. 1.

Внутренний контур двухкомпонентной центробежной форсунки представляет собой однокомпонентную центробежную форсунку, через которую подается в камеру сгорания окислитель. Она размещается внутри газового вихря внешнего контура, чтобы не мешать его работе. С учетом этого ограничения она рассчитывается как однокомпонентная центробежная форсунка окислителя.

Определяется геометрическая характе-

ристика центробежной форсунки

$$A = \frac{R_{\text{вх.ок}} r_{\text{с.ок}}}{n_{\text{вх.ок}} r_{\text{вх.ок}}^2} \sin \theta_{\text{ок}}, \quad (1)$$

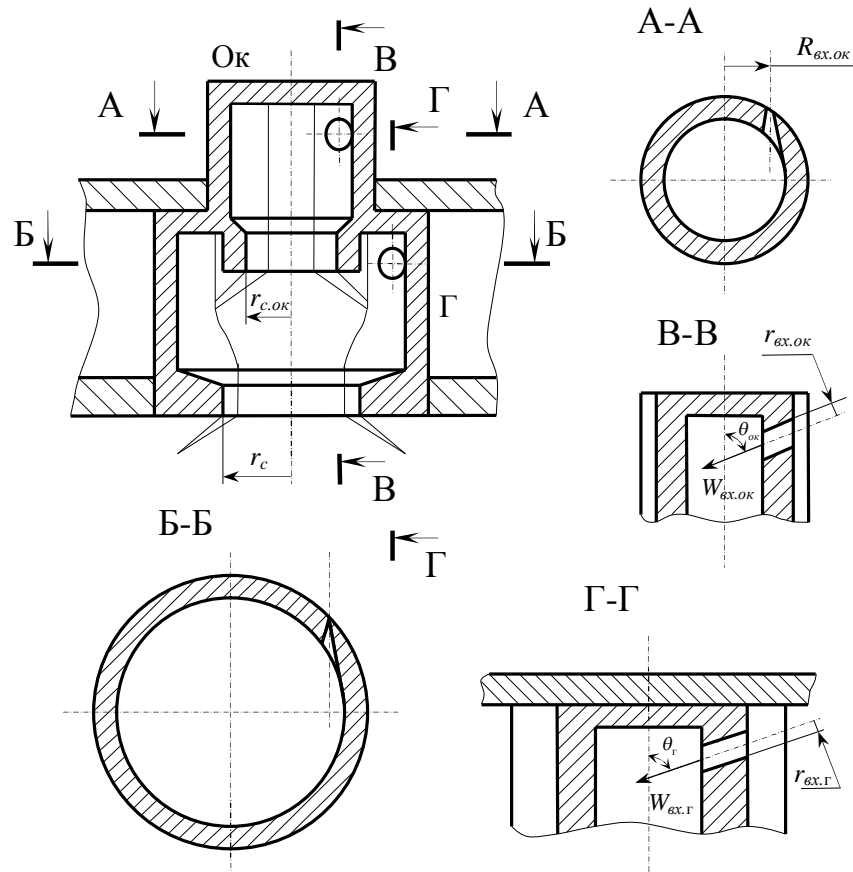


Рис. 1. Расчетная схема двухкомпонентной центробежной эмульсионной форсунки

где $n_{\text{вх.ок}}$ – число входных тангенциальных отверстий окислителя, $\theta_{\text{ок}}$ – угол между направлениями осей входных отверстий и сопла форсунки.

Находится эквивалентная геометрическая характеристика форсунки, учитывающая влияние вязкости окислителя, подаваемого через форсунку,

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

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

По значению эквивалентной геометрической характеристике форсунки вычисляют:

- коэффициент живого сечения сопла форсунки

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

- коэффициент расхода центробежной форсунки

$$\mu = \varphi \sqrt{\frac{\varphi}{2 - \varphi}}; \quad (4)$$

- средний угол факела распыла

$$\text{tg } \bar{\alpha} = \frac{2\mu A_3}{\sqrt{(1 + \sqrt{1 - \varphi})^2 - 4\mu^2 A_3^2}}. \quad (5)$$

Находят площадь и диаметр сопла форсунки, обеспечивающих необходимый расход окислителя через форсунку при потребном перепаде давления на форсунке $\Delta p_{\text{ф.ок}}$

$$F_{\text{ф.ок}} = \frac{\pi d_{\text{с.ок}}^2}{4} = \frac{\dot{m}_{\text{ф.ок}}}{\mu_{\text{ф.ок}} \sqrt{2 \rho_{\text{ок}} \Delta p_{\text{ф.ок}}}}, \quad (6)$$

где $\rho_{\text{ок}}$ – плотность окислителя перед форсункой.

Получим выражение для геометрической характеристики внешнего контура двухкомпонентной эмульсионной форсунки. Сюда подаются по тангенциальным каналам горючее, из внутреннего контура окислитель, а вытекает через сопло эмульсионная смесь. Рассмотрим простейший случай течения через форсунку компонентов топлива, являющихся идеальными жидкостями.

Если давления подачи окислителя и горючего перед форсункой одинаковые, то уравнение Бернулли для сечения на входе в

камеры закручивания наружного и внутреннего контуров форсунки запишется

$$p_{\text{н.ок}} = p_{\text{вх.ок}} + \frac{\rho_{\text{ок}} W_{\text{вх.ок}}^2}{2}, \quad (7)$$

$$p_{\text{н.г}} = p_{\text{вх.г}} + \frac{\rho_{\text{г}} W_{\text{вх.г}}^2}{2}, \quad (8)$$

$$p_{\text{вх.ок}} + \frac{\rho_{\text{ок}} W_{\text{вх.ок}}^2}{2} = p_{\text{вх.г}} + \frac{\rho_{\text{г}} W_{\text{вх.г}}^2}{2}, \quad (9)$$

где $p_{\text{вх.ок}}$, $p_{\text{вх.г}}$, $W_{\text{вх.ок}}$ и $W_{\text{вх.г}}$ – статическое давление и скорость на входе в камеру закручивания окислителя и горючего соответственно.

Из уравнения (9) следует, что условие равенства давлений на входе в камеру закручивания внешнего и внутреннего контуров форсунки $p_{\text{вх.г}} = p_{\text{вх.ок}}$ будет соблюдаться, когда

$$W_{\text{вх.г}} = \sqrt{\frac{\rho_{\text{ок}}}{\rho_{\text{г}}}} \cdot W_{\text{вх.ок}} = \sqrt{e} \cdot W_{\text{вх.ок}}. \quad (10)$$

Массовый расход топлива через эмульсионную форсунку

$$\dot{m}_{\text{ф}} = \dot{m}_{\text{ф.ок}} + \dot{m}_{\text{ф.г}} = \dot{m}_{\text{ф.ок}} \frac{1 + K_m}{K_m} = \dot{m}_{\text{ф.г}} (1 + K_m), \quad (11)$$

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

$$\dot{m}_{\text{ф}} = \pi r_{\text{вх.ок}}^2 n_{\text{вх.ок}} \rho_{\text{ок}} W_{\text{вх.ок}} \frac{1 + K_m}{K_m} = \pi r_{\text{вх.г}}^2 n_{\text{вх.г}} \rho_{\text{г}} \times W_{\text{вх.г}} (1 + K_m), \quad (12)$$

где $n_{\text{вх.ок}}$ и $n_{\text{вх.г}}$ – число входных тангенциальных отверстий окислителя и горючего в камеры закручивания внутреннего и внешнего контуров форсунки соответственно.

Запишем закон сохранения момента количества движения компонентов топлива и эмульсионной смеси применительно к рассматриваемой форсунке, пренебрегая потерями энергии при смешении компонентов,

$$\dot{m}_{\text{ф}} W_{\text{и.э.к}} R_{\text{вх.г}} = \dot{m}_{\text{ф.ок}} W_{\text{вх.ок}} R_{\text{вх.ок}} \sin \theta_{\text{ок}} + \dot{m}_{\text{ф.г}} W_{\text{вх.г}} R_{\text{вх.г}} \sin \theta_{\text{г}}, \quad (13)$$

где $W_{\text{и.э.к}}$ – окружная составляющая скорости движения эмульсии в камере закручивания наружного контура форсунки, $\theta_{\text{ок}}$ и $\theta_{\text{г}}$ – угол наклона направления оси входного тан-

генциального отверстия подачи окислителя и горючего к оси форсунки соответственно.

Из уравнения (13) с учетом выражений (10) и (11) получим

$$W_{u.э.к} = W_{ex.ок} \frac{K_m \frac{R_{ex.ок}}{R_{ex.г}} \sin \theta_{ок} + \sqrt{e} \sin \theta_{г}}{1 + K_m}, \quad (14)$$

или

$$W_{u.э.к} = W_{ex.г} \frac{K_m \frac{R_{ex.ок}}{R_{ex.г}} \sin \theta_{ок} + \sqrt{e} \sin \theta_{г}}{\sqrt{e}(1 + K_m)}. \quad (15)$$

Получим уравнение для определения плотности эмульсии, образующейся при смешении окислителя и горючего в камере закручивания внешнего контура форсунки, исходя из свойства аддитивности объемов компонентов, составляющих смесь,

$$\frac{\dot{m}_{\phi}}{\rho_{э}} = \frac{\dot{m}_{\phi.ок}}{\rho_{ок}} + \frac{\dot{m}_{\phi.г}}{\rho_{г}}. \quad (16)$$

После соответствующих преобразований, получаем

$$\rho_{э} = \frac{\rho_{ок} \rho_{г} (1 + K_m)}{\rho_{ок} + K_m \rho_{г}} = \frac{\rho_{ок} (1 + K_m)}{K_m + e}. \quad (17)$$

Закон сохранения момента количества движения эмульсии применительно к камере закручивания наружного контура и выходному сечению сопла запишется

$$W_{u.э.к} R_{ex.г} = W_{u.э} r, \quad (18)$$

где $W_{u.э}$ – окружная составляющая скорости эмульсии в выходном сечении сопла на радиусе r .

Из уравнений (18), (14) и (15) получим

$$W_{ex.ок} = W_{u.э} \frac{1 + K_m}{K_m \frac{R_{ex.ок}}{R_{ex.г}} \sin \theta_{ок} + \sqrt{e} \sin \theta_{г}} \frac{r}{R_{ex.г}}, \quad (19)$$

$$W_{ex.г} = W_{u.э} \frac{1 + K_m}{K_m \frac{1}{\sqrt{e}} \frac{R_{ex.ок}}{R_{ex.г}} \sin \theta_{ок} + \sin \theta_{г}} \frac{r}{R_{ex.г}}. \quad (20)$$

Массовый расход эмульсии (топлива) через форсунку в выходном сечении сопла

$$\dot{m}_{\phi} = \varphi \pi r_c^2 \rho_{э} W_{a.э}, \quad (21)$$

где φ – коэффициент живого сечения сопла форсунки; $W_{a.э}$ – осевая составляющая скорости течения эмульсии в сопле.

Уравнение сохранения массового расхода топлива через форсунку запишется

$$\varphi \pi r_c^2 \rho_{э} W_{a.э} = \pi r_{ex.ок}^2 n_{ex.ок} \rho_{ок} W_{ex.ок} \frac{1 + K_m}{K_m} =$$

$$= \pi r_{ex.г}^2 n_{ex.г} \rho_{г} W_{ex.г} (1 + K_m).$$

С учетом полученных ранее уравнений (17), (19) и (20) последнее выражение запишется

$$\frac{\varphi W_{a.э} r_c^2}{K_m + e} = W_{u.э} \frac{1 + K_m}{K_m \frac{R_{ex.ок}}{R_{ex.г}} \sin \theta_{ок} + \sqrt{e} \sin \theta_{г}} \times \times \frac{r}{R_{ex.г}} \frac{r_{ex.ок}^2 n_{ex.ок}}{K_m}, \quad (22)$$

или

$$\frac{\varphi W_{a.э} r_c^2 \rho_{ок}}{K_m + e} = W_{u.э} \frac{(1 + K_m) r_{ex.г}^2 n_{ex.г} \rho_{г}}{K_m \frac{1}{\sqrt{e}} \frac{R_{ex.ок}}{R_{ex.г}} \sin \theta_{ок} + \sin \theta_{г}} \times \times \frac{r}{R_{ex.г}}. \quad (23)$$

Из уравнения (22) получим

$$W_{u.э} = W_{a.э} \varphi \frac{\left(K_m \frac{R_{ex.ок}}{R_{ex.г}} \sin \theta_{ок} + \sqrt{e} \sin \theta_{г} \right) K_m}{(1 + K_m)(K_m + e)} \times \times \frac{R_{ex.г} r_c}{n_{ex.ок} r_{ex.ок}^2} \frac{r_c}{r}. \quad (24)$$

С учетом выражения $K_m = \sqrt{e} \frac{n_{ex.ок} r_{ex.ок}^2}{n_{ex.г} r_{ex.г}^2}$

окончательно запишем

$$W_{u.э} = W_{a.э} \varphi \frac{\left(K_m \frac{R_{ex.ок}}{R_{ex.г}} \sin \theta_{ок} + \sqrt{e} \sin \theta_{г} \right) \sqrt{e}}{(1 + K_m)(K_m + e)} \times \times \frac{R_{ex.г} r_c}{n_{ex.г} r_{ex.г}^2} \frac{r_c}{r}. \quad (25)$$

Из уравнения (23) после соответствующих преобразований получается точно такое же уравнение (25).

Для простейшей центробежной форсунки было получено в [1] выражение

$$W_u = W_a \varphi A \frac{r_c}{r}. \quad (26)$$

Сравнивая это выражение с аналогичным выражением (25), полученным для эмульсионной форсунки, можно записать

$$W_{и.э} = W_{а.э} \varphi A_э \frac{r_c}{r}, \quad (27)$$

где $A_э$ – геометрическая характеристика внешнего контура эмульсионной форсунки, являющаяся критерием гидродинамического подобия течения эмульсии во внешнем контуре форсунки.

Выражение для геометрической характеристики внешнего контура идеальной эмульсионной форсунки имеет вид

$$A_{э.м} = \frac{\left(K_m \frac{R_{э.ок}}{R_{э.г}} \sin \theta_{ок} + \sqrt{e} \sin \theta_{г} \right) \sqrt{e}}{(1 + K_m)(K_m + e)} \frac{R_{э.г} r_c}{n_{э.г} r_c^2} \frac{r_c}{r}. \quad (28)$$

Находится эквивалентная геометрическая характеристика эмульсионной форсунки, учитывающая влияние вязкости эмульсии, образующейся в камере закручивания внешнего контура и вытекающей из форсунки,

$$A_{э.эм} = \frac{A_{э.м}}{1 + \frac{\lambda}{2} A_{э.м} \left(\frac{(R_{э.г} + r_{э.г})^2 + r_{э.г}}{r_{э.г}^2} - 1 \right)}, \quad (29)$$

где λ – коэффициент трения, определяемый при условиях на входе во внешний контур форсунки эмульсии по эмпирической зависимости

$$\lg \lambda = \frac{25,8}{(\lg \text{Re}_{э.г})^{2,58}} - 2. \quad (30)$$

Число Рейнольдса

$$\text{Re}_{э.г} = \frac{W_{э.э} d_{эк} \rho_э}{\eta_э}, \quad (31)$$

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

Динамическая вязкость эмульсии определяется по динамической вязкости её компонентов

$$\eta_э = \frac{\eta_{г} + K_m \eta_{ок}}{1 + K_m}. \quad (32)$$

Эквивалентный диаметр входных тангенциальных отверстий внешнего контура с общей площадью $n_{э.г} F_{э.г}$

$$d_{эк} = \sqrt{\frac{4n_{э.г} F_{э.г}}{\pi}} = d_{э.г} \sqrt{n_{э.г}}. \quad (33)$$

По значению эквивалентной геометрической характеристика эмульсионной форсунки $A_{э.эм}$ вычисляют коэффициент живого сечения сопла форсунки

$$\varphi_э = 1 - \frac{r_{ж.э}^2}{r_c^2} = \frac{1}{\left(\sqrt[3]{\frac{A_{э.эм}}{2\sqrt{2}} + \sqrt{\frac{A_{э.эм}^2}{8} - \frac{1}{27}}} + \sqrt[3]{\frac{A_{э.эм}}{2\sqrt{2}} - \sqrt{\frac{A_{э.эм}^2}{8} - \frac{1}{27}}} \right)^2}, \quad (34)$$

коэффициент расхода форсунки

$$\mu_э = \varphi_э \sqrt{\frac{\varphi_э}{2 - \varphi_э}}, \quad (35)$$

средний угол факела распыла

$$\text{tg } \bar{\alpha}_э = \frac{2\mu_э A_{э.эм}}{\sqrt{(1 + \sqrt{1 - \varphi_э})^2 - 4\mu_э^2 A_{э.эм}^2}}. \quad (36)$$

Находят площадь и диаметр сопла форсунки, обеспечивающие необходимый расход окислителя и горючего через эмульсионную форсунку при потребном перепаде давления на внутреннем $\Delta p_{ф.ок}$ и внешнем $\Delta p_{ф.г}$ её контурах,

$$F_{ф.э} = \frac{\pi d_c^2}{4} = \frac{\dot{m}_ф}{\mu_э \sqrt{2 \rho_э \Delta p_{ф.г}}}. \quad (37)$$

При уточненном расчете эмульсионной форсунки необходимо учесть влияние конкретных конструктивных особенностей проектируемой двухкомпонентной центробежной эмульсионной форсунки.

Библиографический список

1. Добровольский, М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования: Учебник для вузов.– 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. Д.А. Ягодникова.– М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.– 488 с.
2. Васильев, А.П. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей / 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 / Н.П. Сточек, А.С. Шапиро.– М.: Машиностроение, 1978. – 128 с.

References

1. Dobrovolskij M.V. Liquid-fuel rocket engines. Design basis: manual for institutes of

higher education. – 2nd edition / Edited by D.A. Yagodnikov. – М.: BMSTU, 2005. – 488 p.

2. Theory and design basis of liquid-fuel rocket engines/ A.P. Vasilev, M.V. Kudrjavcev, V.A. Kuznecov and others; Edited by V.M. Kudrjavcev. – М.: Vysshaya Shkola, 1993.

3. Stochek N.P., Shapiro A.S. Liquid-fuel rocket engines hydraulics. – М.: Mashinostroyeniye, 1978. – 128 p.

METHOD OF DESIGN CALCULATION OF CENTRIFUGAL EMULSIVE DUPLEX FUEL NOZZLE

© 2009 V. S. Egorychev

Samara State Aerospace University

Design calculation method of duplex centrifugal emulsion spray burner for arbitrary construction scheme is created. Expression for lumped geometric characteristic of emulsion spray burner which takes into consideration influence of viscous emulsion is received. It allows calculate all required parameters of designing emulsion spray burner with required in practice precision.

Fuel nozzle, emulsive duplex fuel nozzle, liquid-fuel rocket Engine, mixture formation, fuel, propellant, oxidizer, method

Информация об авторах

Егорычев Виталий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел. (846) 334-72-00. Область научных интересов: рабочие процессы ЖРДМТ, термодинамика тела переменных массы и состава, неравновесная термодинамика.

Egorychev Vitaliy Sergeevich, Candidate of Technical Science, associate professor of aircraft engines theory department of Samara State Aerospace University. Phone: (846) 334-72-00. Area of research: small-thrust liquid-propellant rocket engines, variable-mass and variable-composition body thermodynamics, nonequilibrium thermodynamics.