

Список литературы

1. Панин В.Ф. Конструкции с сотовым заполнителем. М.: Машиностроение, 1982. С.182
2. Ендогур А.И., Вайнберг М.В., Иерусалимский К.М. Сотовые конструкции. М.: Машиностроение, 1986. С. 198

МОДЕЛЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА МНОГОФАЗНОГО СТРУЙНОГО АППАРАТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ РАКЕТНОЙ КАМЕРЫ

Первышин А.Н., Винокуров М.В.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Конверсионное использование опыта, накопленного при создании ракетных двигателей малой тяги открывает широкие перспективы совершенствования рабочего процесса технологических установок различного назначения. В частности, применение газогенератора на базе ракетной камеры в составе струйного аппарата существенно повышает его энергооборуженность и расширяет спектр решаемых технологических задач, к числу которых можно отнести резку, нанесение износостойких и коррозионно-стойких покрытий, струйно-абразивную обработку и ряд других.

Разработка такого струйного аппарата требует решения ряда специфических вопросов, обусловленных наличием высокотемпературной сверхзвуковой струи продуктов сгорания ракетного топлива в качестве активного рабочего тела, и многофазного пассивного рабочего тела в состав которого, в общем случае, входят сыпучий компонент (абразив, напыляемый материал и т.п.), жидкость (вода для пылегашения и теплозащиты газодинамического тракта) и транспортирующий газ.

Ниже рассмотрена модель рабочего процесса многофазного струйного аппарата технологической установки на базе ракетной камеры.

Вывод уравнений выполнен в рамках следующих основных допущений:

- все компоненты рабочего тела равномерно распределены по объему смеси и находятся в тепловом и механическом равновесии друг с другом;
- изменение состояния смеси не сопровождается химическими превращениями;
- весь жидкий компонент в пассивном рабочем теле находится в конденсированном состоянии и при смесеобразовании (с активным рабочим телом) испаряется полностью;

- физические константы компонентов смеси не зависят от температуры и давления.

Основные соотношения, отражающие связь между физическими константами и параметрами состояния рабочего тела струйного аппарата и его составляющих, полученные в рамках указанных допущений, приведены ниже.

1. Активное рабочее тело (продукты сгорания компонентов ракетного топлива)

1.1 Основные константы:

удельная изобарная теплоемкость, Дж/(кг*К)

$$C_{p,a} = \frac{\alpha_{ок} Nu}{(\alpha_{ок} Km^{cm} + 1)(T_a^0 - T_{н.у})} \quad (\text{при } \alpha_{ок} < 1);$$

$$C_{p,a} = \frac{Nu}{(\alpha_{ок} Km^{cm} + 1)(T_a^0 - T_{н.у})} \quad (\text{при } \alpha_{ок} \geq 1);$$

газовая постоянная, Дж/(кг*К)

$$R_a = R / \mu_a;$$

удельная изохорная теплоемкость, Дж/(кг*К)

$$C_{v,a} = C_{p,a} - R_a;$$

показатель адиабаты

$$k_a = C_{p,a} / C_{v,a}.$$

Здесь Nu , Km^{ct} и $T_{н.у}$ - теплотворная способность, среднее массовое стехиометрическое соотношение и температура компонентов топлива соответственно; T_a^0 и μ_a - полная температура и молярная масса продуктов сгорания, рассчитанные по заданным значениям коэффициента избытка окислителя $\alpha_{ок}$ и давления в камере сгорания P_a^0 по методике [1].

1.2 Основные уравнения:

уравнение состояния

$$P_a = \rho_a R_a T_a;$$

уравнение адиабаты

$$P_a^0 / P_a = \left(T_a^0 / T_a \right)^{k_a / (k_a - 1)};$$

уравнение сохранения энергии

$$l_a = \frac{W_a^2}{2} = \frac{k_a}{k_a - 1} R_a T_a^0 \left[1 - \left(\frac{P_a}{P_a^0} \right)^{\frac{k_a - 1}{k_a}} \right];$$

уравнение Майера

$$\bar{R}_a = C_{p,a} - C_{v,a} = C_{p,a} (\bar{k}_a - 1) / \bar{k}_a;$$

соотношения для внутренней энергии, энтальпии и скорости звука в потоке соответственно:

$$U_o = C_{v,a} T_a; \quad i_o = C_{p,a} T_a; \quad a_o = \sqrt{k_a R_o T_a};$$

где ρ_a , W_a , l_a - плотность, скорость и удельная техническая работа рабочего тела.

2. Пассивное рабочее тело, представляющее собой смесь разнофазных компонентов, свойства которой изложены в [2]

Суммарный расход пассивного рабочего тела m_n состоит из расхода газообразного m_g , жидкого $m_{ж}$ и твердого (сыпучего) m_t компонентов. Надстрочные индексы "*" и "***" соответствуют конденсированному и парообразному состоянию жидкого компонента, соответственно. $\varepsilon_i = m_i / m_n$ - массовая доля i -ого компонента смеси.

2.1 Основные константы и параметры состояния:
удельные изобарная и изохорная теплоемкости, Дж/(кг*К)

$$C_{p,n} = C_{p,z} \varepsilon_z + C_{жс}^* \varepsilon_{жс} + C_m \varepsilon_m;$$

$$C_{v,n} = C_{v,z} \varepsilon_z + C_{жс}^* \varepsilon_{жс} + C_m \varepsilon_m;$$

газовая постоянная, Дж/(кг*К)

$$R_n = R_z \varepsilon_z;$$

показатель адиабаты

$$k_n = C_{p,n} / C_{v,n};$$

плотность, кг/м³

$$\rho_n = \frac{1}{\varepsilon_z / \rho_z + \varepsilon_{жс} / \rho_{жс}^* + \varepsilon_m / \rho_m}.$$

2.2 Основные уравнения:

уравнение состояния

$$P_n \left[1 - \rho_n (\varepsilon_{жс} / \rho_{жс}^* + \varepsilon_m / \rho_m) \right] = \rho_n R_n T_n;$$

уравнение адиабаты

$$P_n^0 / P_n = \left(T_n^0 / T_n \right)^{k_n / (k_n - 1)};$$

уравнение сохранения энергии

$$l_n = \frac{W_n^2}{2} = \frac{k_n}{k_n - 1} R_n T_n^0 \left[1 - \left(\frac{P_n}{P_n^0} \right)^{\frac{k_n - 1}{k_n}} \right] + (P_n^0 - P_n) \left(\frac{\varepsilon_{жс}}{\rho_{жс}^*} + \frac{\varepsilon_m}{\rho_m} \right);$$

уравнение Майера

$$R_n = C_{p,n} - C_{v,n} = C_{p,n} (k_n - 1) / k_n;$$

соотношения для внутренней энергии, энтальпии и скорости звука в потоке соответственно:

$$U_n = C_{v,n} T_n = U_z + U_{жс} + U_m;$$

$$i_n = C_{p,n} T_n + P_n \left(\varepsilon_{жс} / \rho_{жс}^* + \varepsilon_m / \rho_m \right);$$

$$a_n = \frac{\sqrt{k_n R_n T_n}}{1 - \rho_n \left(\varepsilon_{жс} / \rho_{жс}^* + \varepsilon_m / \rho_m \right)} = \frac{P_n}{\rho_n} \sqrt{\frac{k_n}{R_n T_n}}.$$

3. Рабочее тело в камере смешения (смесь активного и пассивного рабочих тел)

$\gamma = m_n / m_a$ - коэффициент эжекции.

3.1 Основные константы и параметры состояния:
удельные изобарная и изохорная теплоемкости, Дж/(кг*К)

$$C_{p,cm} = \left[C_{p,a} + \gamma (C_{p,z} \varepsilon_z + C_{p,жс}^{**} \varepsilon_{жс} + C_m \varepsilon_m) \right] / (\gamma + 1);$$

$$C_{v,cm} = \left[C_{v,a} + \gamma (C_{v,z} \varepsilon_z + C_{v,жс}^{**} \varepsilon_{жс} + C_m \varepsilon_m) \right] / (\gamma + 1);$$

газовая постоянная, Дж/(кг*К)

$$R_{cm} = \left[R_a + \gamma (R_z \varepsilon_z + R_{жс}^{**} \varepsilon_{жс}) \right] / (\gamma + 1);$$

показатель адиабаты

$$k_{cm} = C_{p,cm} / C_{v,cm};$$

плотность, кг/м³

$$\rho_{cm} = \frac{(\gamma + 1)}{1 / \rho_a + \gamma (\varepsilon_z / \rho_z + \varepsilon_{жс} / \rho_{жс}^{**} + \varepsilon_m / \rho_m)}.$$

3.2 Основные уравнения:

уравнение состояния

$$P_{cm} \left[1 - \frac{\gamma P_{cm}}{(\gamma + 1) \rho_m} \varepsilon_m \right] = \rho_{cm} R_{cm} T_{cm};$$

уравнение адиабаты

$$P_{cm}^0 / P_{cm} = \left(T_{cm}^0 / T_{cm} \right)^{k_{cm} / (k_{cm} - 1)};$$

уравнение сохранения энергии

$$l_{cm} = \frac{W_{cm}^2}{2} = \frac{k_{cm}}{k_{cm} - 1} R_{cm} T_{cm}^0 \left[1 - \left(\frac{P_{cm}}{P_{cm}^0} \right)^{\frac{k_{cm} - 1}{k_{cm}}} \right] + (P_{cm}^0 - P_{cm}) \frac{\gamma}{(\gamma + 1)} \frac{\varepsilon_m}{\rho_m};$$

уравнение Майера

$$R_{cm} = C_{p,cm} - C_{v,cm} = C_{p,cm} (k_{cm} - 1) / k_{cm};$$

соотношения для внутренней энергии, энтальпии и скорости звука в потоке соответственно:

$$U_{cm} = C_{v,cm} T_{cm} = (U_o + \gamma U_n) / (\gamma + 1);$$

$$i_{cm} = C_{p,cm} T_{cm} + P_{cm} \gamma \varepsilon_m / [(\gamma + 1) \rho_m];$$

$$a_{cm} = \frac{\sqrt{k_{cm} R_{cm} T_{cm}}}{1 - \rho_{cm} \gamma \varepsilon_m / [(\gamma + 1) \rho_m]} = \frac{P_{cm}}{\rho_{cm}} \sqrt{\frac{k_{cm}}{R_{cm} T_{cm}}}.$$

4. Уравнения эжекции

4.1 Уравнение сохранения энергии (в форме, удобной для определения T_{cm0})

$$T_{cm}^0 = \frac{C_{p,a} T_a^0 + \gamma \left\{ C_{p,n} T_n^0 - [\varepsilon_{ж} r_{ж} + (P_{cm}^0 - P_n^0) \varepsilon_m / \rho_m - P_n^0 \varepsilon_{ж} / \rho_{ж}^*] \right\}}{C_{p,cm} (\gamma + 1)};$$

где $r_{ж}$ - удельная теплота кипения жидкости при давлении смесеобразования.

4.2 Уравнение сохранения импульса

$$W_{cm} = (W_o + \gamma W_n) / (\gamma + 1);$$

или с учетом вязких потерь в газодинамическом тракте

$$l_{cm} = (\varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \sqrt{l_a} + \gamma \varphi_2 \varphi_3 \varphi_4 \sqrt{l_n})^2 / (\gamma + 1)^2;$$

где $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ коэффициенты потерь скорости рабочего тела в активном сопле, камере смешения, выходном диффузоре и пассивном сопле струйного аппарата, соответственно.

Предложенная модель рабочего процесса многофазного струйного аппарата позволит определить режимные параметры течения рабочего тела и геометрические характеристики газодинамического тракта по заданным эксплуатационным параметрам технологической установки.

Список литературы

1. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. Том 1. Методы расчета / Алемасов В.Е. и др. Под ред. Глушко В.П. - М.: - ВИНТИ - 266 с.
2. Васильев Ю.Н. Теория двухфазного газожидкостного эжектора с цилиндрической камерой смешения. Сб. "Лопаточные машины и струйные аппараты". Вып. 5. - М.: Машиностроение, 1971. - с. 175 - 261.