

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ

Первышин А.Н., Самойлов П.А.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Уникальные возможности концентрации энергии в струе продуктов сгорания, истекающей из ракетной камеры, привели к созданию плазмохимических генераторов концентрированных потоков энергии (ПГКПЭ) различного технологического назначения.

Однако при разработке ПГКПЭ, как правило, выбор режимных и конструктивных параметров генератора, а также их доводка ведутся на основе получения максимального тепловыделения в камере или аналогичных параметров эффективности, характерных для ракетных камер, без учета специфики соответствующего технологического процесса. Ниже, на примере разделительной резки материалов рассмотрен метод определения связей целевых функций технологических процессов с параметрами ПГКПЭ и технологического объекта путем введения обобщенного критерия технологической эффективности.

Важнейшей технологической характеристикой ПГКПЭ, определяющей в значительной степени его облик при проектировании, является скорость резки материала сверхзвуковой струей продуктов сгорания. Будем считать, что резка следует сразу за прожиганием отверстия [1] и представляет собой перемещение источника тепла на постоянном расстоянии h в направлении y (рис.1) со скоростью w_p , достаточной для образования реза. Пусть за время $d\tau$ поверхность плавления углубляется в вещество на величину dy . Причем, если поверхность плавления сохраняет свою форму в процессе движения, то независимо от этой формы элементарный вы-плавленный объем можно определить как

$$dV = (d)\delta dy,$$

а количество теплоты, которое необходимо затратить для этого:

$$dQ_m = \rho\gamma(d)\delta dy, \quad (1)$$

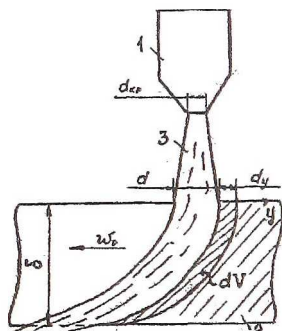


Рис.1 Схема резки, 1-генератор, 2-преграда, 3-струя

где ρ, γ - плотность и удельная теплота фазового перехода материала, d - ширина реза.

В рамках сформулированных в [2] допущений, количество теплоты, поступившей за это время к материалу, с учетом совпадения поверхностей активного взаимодействия и плавления, можно записать:

$$dQ_1 = \varphi_\beta^2 \psi_{nl} K'_p N d \tau, \quad (2)$$

где K'_p - коэффициент теплового взаимодействия струи продуктов сгорания с материалом в режиме непрерывной резки, φ_β , N - полнота расходного комплекса и расчетная мощность генератора, ψ_{nl} - показатель возможности передачи тепловой энергии струи материалу [3].

Режим резки задается оператором и при очень малых скоростях резки, величина Kp стремится к нулю. С увеличением скорости величина Kp увеличивается достигая максимума (Kp) для максимальной скорости резки. Ее можно определить, сопоставляя (1) и (2):

$$w_p = \varphi_\beta^2 \psi_{nl} K_p N / \rho \gamma \delta d. \quad (3)$$

С учетом термодинамических характеристик топлива - среднего показателя изоэнтропии расширения продуктов сгорания в камере n , зависящего от него коэффициента $A(n)$, расчетного расходного комплекса βm , или удельного теплового потока в области критического сечения генератора q_1 или первой "бочки" струи q_2 [4], а также расхода топлива m_T , выражение (3) принимает вид:

$$w_p = K_p \varphi_\beta^2 \frac{\varphi_{nl}}{\rho \gamma} \frac{(n/n-1) A^2(n) \beta_T^2 \dot{m}_T}{\delta (d/d_{kp})} \frac{1}{d_{kp}}, \quad (4)$$

или в форме тепловых потоков:

$$w_p = \frac{\pi}{2} K_p \varphi_\beta^2 \frac{\psi_{nl}}{\rho \gamma} \frac{q_1}{w_\delta (d/d_{kp})^2}, \quad (5)$$

или в безразмерной форме

$$w_p = (\pi K_p / 2 w_\delta) (d_m / d)^2, \quad (6)$$

где $\bar{w} = w_p / w_{p,y}$ - безразмерная скорость,

$w_\delta = 2\delta / d$ - относительная толщина преграды,

d_m - диаметр сечения первой "бочки" струи,

$w_{p,y} = \varphi_\beta^2 q_2 \psi_{nl} / \rho \gamma$ - условная скорость резки. (7)

Здесь введено понятие условной скорости резки - критерия, определяющего эффективность воздействия энергии топлива, при

определенных условиях его преобразования в генераторе, на соответствующее вещество. Это скорость перемещения источника тепла при резке материала относительной толщиной $w_\delta = 1$, расположенного в области газодинамического участка струи при коэффициенте тепловой эффективности $K_p = 2/\pi$. Этот критерий позволяет сопоставить эффективность резки материалов различными топливными композициями.

Для оценки натуральной скорости резки по приведенным выражениям необходимо знать величину K_p . Многочисленные эксперименты для различных топливных композиций ($O_2 + H_2$, CH_4 , C_3H_8 , воздух + C_3H_8), материалов и других факторов [1] позволили установить, что определяющим является состав топлива. Величина K_p достигает максимальных значений в области максимальных тепловых потоков [4]. Для оценочных расчетов при $\alpha = 0,7 \dots 1,1$ можно принять $K_p = 3,2\%$ по крайней мере для алюминиевых сплавов и нержавеющей сталей.

Область газодинамического участка струи является определяющей при выборе рабочей точки в большинстве технологических задач. В этом случае уравнение резки принимает вид:

$$\overline{w_p} = \pi K_p / 2w_\delta. \quad (8)$$

Для оценки эффективности транспортирования энергии от ПГКПЭ к технологическому объекту введем коэффициент струи:

$$K_c = d / d_a. \quad (9)$$

Этот коэффициент определяет связь диаметра выходного сечения сопла и ширины реза. Для сверхкритических режимов истечения из сужающегося сопла ПГКПЭ величина этого коэффициента определяется степенью нерасчётности сопла [4]:

$$K_c = n_a^{0.6} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{0.6k}{k-1}} \left(\frac{p_k}{p_h} \right)^{0.6}. \quad (10)$$

Если режим истечения из сопла докритический, то коэффициент струи можно представить следующим образом:

$$K_c = \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}} \left(\frac{p_h}{p_k} \right). \quad (11)$$

Предложенное выражение для критического режима истечения из сопла соответствует (10), а в дозвуковой области на начальном участке струи, по крайней мере, качественно, отвечает экспериментальным зависимостям [5].

Рассмотрим уравнение резки для идеального рабочего процесса в камере сгорания ПГКПЭ ($\varphi_\beta = 1$), введя в (3) коэффициент струи в форме (9):

$$w_p = Z_p N / K_c \delta d_a, \quad (12)$$

где $Z_p = \psi_{nr} K_p / \rho \gamma$ - коэффициент, определяющий условия теплообмена в зоне реза и теплофизические свойства технологического объекта.

Для определения тепловой мощности ПГКПЭ включая и докритические режимы истечения из сопла на основании термодинамической модели их рабочего процесса предложенной в [5] можно получить:

$$N = A_1(k) \beta_a^2 \dot{m}_T / \bar{\beta}^2, \quad (13)$$

$$\text{где } A_1(k) = \frac{k^2}{k-1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}, \quad (14)$$

$$\beta_a = \frac{P_k F_a}{m_T} = \bar{\beta} \beta \quad (15)$$

- расходный комплекс, отнесенный к выходному сечению сопла, в том числе и на докритических режимах работы, β - классический расходный комплекс,

$$\bar{\beta} = \frac{1}{\lambda_a} \left[\frac{2}{k+1 - (k-1)\lambda_a^2} \right]^{\frac{1}{k-1}} - \text{относительный расходный комплекс.} \quad (16)$$

Выражения (12...16) пригодны для любых режимов истечения из сопла. Для критических и сверхкритических режимов $\lambda_a=1$, $\bar{\beta}=1$ они принимают классический вид.

Сопоставляя выражения (8...16), можно получить интегральное уравнение непрерывной резки материалов в виде:

$$w_p = D \dot{m}_T^{0.5} / \delta. \quad (17)$$

В этом уравнении выделены экстенсивные параметры генератора (\dot{m}_T) и технологического объекта (δ), определяющие скорость разделительной резки, а остальные сгруппированы в обобщенный критерий технологической эффективности:

$$D = D^* f(\lambda_a) \quad (18)$$

$$\text{где } D^* = 0,5 \pi^{0.5} Z_p \rho_h^{0.6} \beta^{1.5} C(k) \rho_k^{-0.1}, \quad (19)$$

$$C(k) = \frac{k^2}{k-1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1+0.4k}{k-1}}, \quad (20)$$

$$f(\lambda_a) = \lambda_a^{0.5} \left(\frac{2}{k+1 - (k-1)\lambda_a^2} \right)^{\frac{1.6k-0.5}{k-1}} = \lambda_a^{0.5} (\lambda_a \bar{\beta})^{1.6k-0.5}. \quad (21)$$

Физически предлагаемый критерий представляет собой предельную скорость резки определенного материала единичной толщины, обеспечиваемую генератором с единичным расходом топлива при соот-

ветствующих коэффициентах потерь. Моделью учитываются три вида потерь, которые считаются независимыми.

1. Потери в камере сгорания. Выражение (18) получено в предположении, что полнота расходного комплекса $\varphi_{\beta}=1$, т.е. эти потери отсутствуют. Из (18) следует, что влияние потерь в камере сгорания можно оценить выражением:

$$D_{\ominus} = \varphi_{\beta}^{1,4} D. \quad (22)$$

2. Потери при транспортировании энергии струей продуктов сгорания от генератора к технологическому объекту. Их влияние определяется коэффициентом струи. В уравнении (18) это влияние учтено выражениями (10,11). Однако коэффициент струи достаточно просто определить экспериментально, что позволяет с помощью выражений (12,13,17) найти и соответствующее значение D . Как следует из (12), скорость резки, а значит и D при прочих равных условиях обратно пропорциональны коэффициенту струи.

3. Потери энергии в зоне реза учитываются коэффициентом теплового взаимодействия струи продуктов сгорания с материалом преграды в режиме непрерывной резки (K_C). Как следует из (12) он линейно связан со скоростью резки и обобщенным критерием технологической эффективности D . Это позволяет используя уравнение (19), а на докритических режимах истечения (18), с учетом уравнений (17,22), в которые входят величины, сравнительно просто определяемые экспериментально, найти величину K_C . Как показано выше, в области сверхкритических режимов истечения величина K_C практически не зависит от вида топлива, обрабатываемого материала и других коэффициентов потерь. Это позволяет использовать экспериментальное значение K_C для проектных расчетов. Область докритических режимов нуждается в дополнительном экспериментальном исследовании.

Полученные выражения определяют связь обобщенного критерия технологической эффективности не только с полнотой преобразования химической энергии топлива в полезную работу технологического процесса, но и собственно с энергетикой топлива, термодинамическими и теплофизическими свойствами продуктов сгорания и материала преграды, параметрами окружающей среды и, наконец, с особенностями взаимодействия струи с преградой. В свою очередь в [5] установлена связь перечисленных параметров с координатами рабочей точки ПГКПЭ, а именно с видом и составом топлива, давлением в камере сгорания, расходом топлива. Причем, как следует из (19), связь с последними двумя координатами незначительна. Это позволяет на стадии проектирования ПГКПЭ выбрать вид и состав топлива, используя в качестве критерия оптимизации (целевой функции) предлагаемый критерий, а затем уже с помощью (17) определить и расход топлива, необходимый для решения соответствующей технологической задачи. Выбор давления в камере сгорания в связи со слабо выраженной зави-

симостью от него критерия технологической эффективности не может осуществляться таким способом. Оно должно назначаться из эксплуатационных или иных соображений, выходящих за рамки настоящей статьи.

Учитывая относительную простоту экспериментального измерения предложенного критерия, он может быть использован и для определения к.п.д. при превращении химической энергии топлива в полезную работу технологического процесса, в частном случае в теплоту плавления материала в зоне реза. Другими способами определение этого важнейшего параметра весьма затруднительно.

Другим важным применением критерия является возможность переноса результатов экспериментов конкретного ПГКПЭ на другие по виду и составу топлива, на иные по форме и теплофизическим свойствам преграды, иные параметры окружающей среды с помощью выражений (17...22).

И наконец, при серийном производстве ПГКПЭ, уравнение (17) позволяет достаточно просто экспериментально оценить критерий D , а значит и качество изготовления.

Таким образом, предложенный критерий позволяет значительно сократить временные и материальные затраты при проектировании, доводке и серийном изготовлении ПГКПЭ.

Список литературы

1. Первышин А.Н. Разрушение подвижной преграды сверхзвуковой струей продуктов сгорания // Теплоэнергетика.- ВПИ, Воронеж, 1997.- с. 128-131.
2. Разрушение неподвижной преграды сверхзвуковой струей продуктов сгорания химического генератора концентрированного потока энергии / Первышин А.Н., Егорычев В.С., Косенко А.И., Малюгин Р.Н.// Машиностроение, приборостроение, энергетика. - М.: Изд-во Московского университета. - 1995.- с. 76-79.
3. Первышин А.Н. Особенности нагрева преграды сверхзвуковой струей продуктов сгорания // Актуальные проблемы производства, технология, организация, управление. Самара: Изд-во СГАУ.- 1995. - с.57-64.
4. Осипов А.И., Первышин А.Н. Энергетические возможности генераторов концентрированных потоков энергии // Высокотемпературные газовые потоки, их получение и диагностика.- Харьков: Изд-во ХАИ.- 1990.- Вып.5.- с. 28-36.
5. Термодинамическая модель и особенности организации рабочего процесса плазмохимических генераторов концентрированных потоков энергии : Отчет о НИР N 811 / СГАУ.- А.Н. Первышин, П.А. Самойлов - Самара, 1998.