

УДК 621.793.7

К. А. Данько

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА ВНУТРИ ТРАКТА ДВУХКАМЕРНОЙ ГОРЕЛКИ ДЛЯ СВЕРХЗВУКОВОГО ГАЗОПЛАМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Приведена математическая модель, описывающая изменения скорости и температуры продуктов сгорания в тракте двухкамерной горелки для сверхзвукового газопламенного напыления. В качестве компонентов топлива в расчетах приняты МАФ-газ и кислород. Полученные результаты показывают, что благодаря оригинальной конструкции горелки удалось разделить участки нагрева и ускорения частиц напыляемого материала, существенно улучшив условия для тепловой релаксации частиц, а также расширив возможности управления процессом напыления, при этом, не увеличивая габаритных размеров горелки и исключая сужающиеся участки газового тракта по мере движения расплавленных частиц.

Ключевые слова: *сверхзвуковое газопламенное напыление, двухкамерная горелка, математическая модель, тарельчатое сопло со свободным внутренним расширением, эжектор, коэффициент избытка окислителя, термодинамические показатели, эжектируемый поток.*

Введение

С развитием техники и технологии возрастает потребность в функциональных покрытиях, которые позволяют решать задачи по продлению жизненного цикла ответственных нагруженных новых деталей за счет снижения коррозионного, эрозионного и абразивного износа и восстановлению изношенных; сохранению прочностных, твердости и износостойкости деталей в условиях высоких рабочих температур, за счет нанесения термобарьерных покрытий; снижения стоимости деталей за счет использования более дешевых материалов подложки с высококачественным дорогостоящим покрытием [1, 2].

Одним из направлений улучшения качества и снижения стоимости покрытий является усовершенствование оборудования для их нанесения. Для процессов газотермического напыления, наиболее ответственным компонентом, с точки зрения обеспечения показателей качества и экономичности, является горелка – узел, в котором происходят процессы нагрева и ускорения частиц напыляемого материала. На сегодняшний день существует большое разнообразие конструкций горелок для высокоскоростного газопламенного напыления [35]. Для каждой конструкции разработаны математические модели, которые с достаточной для производственных целей точностью позволяют прогнозировать заданные параметры покрытий, за счет управления технологическими параметрами процесса: температурой и скоростью частиц, соотношением компонентов топлива и т. д.

Целью работы является создание математической модели, описывающей изменение скорости и температуры частиц напыляемого материала по ходу их движения в тракте горелки [6] и на участке от выхода из горелки до подложки. Первая часть статьи посвящена моделированию течения продуктов сгорания в пределах тракта горелки.

Несмотря на большое количество исследований в направлении моделирования процессов газопламенного напыления, построение моделей конкретных агрегатов и устройств остается актуальной задачей. Актуальность обуславливается уникальностью комбинации таких факторов, как геометрия и компоновочная схема установки, химические и термодинамические параметры горючей смеси, химические и термодинамические параметры напыляемого материала, предназначенные установки и обуславливаемые им режимы работы.

В ходе анализа существующих публикаций по рассматриваемой теме, были выявлены отдельные соответствия разрабатываемой модели и известных исследований в частях:

- моделирование горения горючей смеси МАФа (метилацетилен-алленовая фракция) с кислородом [7], но в данной работе рассматривается горелочное устройство иного типа и не анализируется состав МАФ-газа;

- моделирование горелочного устройства с внешней и внутренней камерами сгорания [8–12], но в данных исследованиях имеются отличия

от рассматриваемой в работе горелки и расчеты выполнены для других горючих смесей;

- моделирование газо- и термодинамических процессов в различных устройствах [13, 14], но в данных работах рассматриваются общие теоретические аспекты, которые необходимо комплексировать для получения требуемой модели;

- моделирование устройств сверхзвукового напыления [15, 17, 18], но в этих работах рассматриваются иные типы горелок (как правило, однокамерные) и горючих смесей;

- термохимические справочные данные компонент горючей смеси и напыляемого материала [19–21].

Таким образом, актуальной научной задачей является моделирование процессов нагрева и кинематики напыляемых частиц при сверхзвуковом газоплазменном напылении с помощью двухкамерной горелки.

Описание входных данных и допущений

Детально модель двухкамерной горелки описана в [22]. Для последующих расчетов принимаются входные данные, которые удобно разбить на три группы: геометрические, термодинамические и химические.

Геометрические параметры. Горелка состоит из двух сопел (внутреннее с двумя форсунками и наружное), и эжектора с выходной камерой без диффузора. Их геометрические параметры представлены в [22].

Термодинамические параметры:

- температура МАФ газа и кислорода на входе в горелку, а также температура окружающей среды на выходе из горелки;

- давление в камерах сгорания;

- давление окружающей среды на выходе из горелки;

- начальная скорость подачи материала частиц во внутреннюю камеру.

Химические параметры:

- горючий газ – МАФ;

- окислитель – кислород;

- соотношение топливной пары для внутренней камеры – оптимальное для максимизации температуры сгорания, для наружной камеры – оптимальное для максимизации скорости истечения продуктов сгорания;

- напыляемый материал;

- массовая доля частиц в потоке.

Основные допущения, принимаемые при разработке и исследовании модели горелки:

1. Истечение газов описывается теорией турбулентных струй для осесимметричного источника и неподвижной окружающей среды;

2. Газ подчиняется законам идеального газа;

3. Физико-химические свойства газа описываются уравнениями состояния идеального газа;

4. Влияние реакций частиц с газовым потоком не учитывается;

5. Испарения частиц в газовом потоке не происходит;

6. Частицы напыляемого материала имеют сферическую форму, одинаковый диаметр и равномерное распределение по сечению потока;

7. Влияние частиц напыляемого материала на газовый поток не учитывается, по причине малой загрузки потока частицами;

8. Ввод частиц осуществляется на оси струи с нулевой скоростью;

9. Движение частиц в направлении, перпендикулярном к оси потока, не учитывается;

10. На частицу, при ее движении по тракту горелки и от среза камеры смешения эжектора до подложки, действует только сила аэродинамического сопротивления. Действие силы тяжести не учитывается.

Последовательность моделирования следующая: вначале рассматривается течение и нагрев гомогенной газовой струи на различных участках газодинамического тракта; затем моделируется разгон и нагрев частиц напыляемого материала газовым потоком.

Подготовка входных данных

В известных работах [7, 23] процесс горения МАФ газа, в результате которого можно получить множество термодинамических величин, необходимых для последующего развития моделей термодинамики твердой частицы в двухфазном потоке не описан. Так как на сегодня разработаны доступные инструментальные средства, позволяющие моделировать процессы горения многокомпонентных газовых смесей, был выполнен анализ и для последующих исследований совместно использовались программные комплексы TDK и RPA [24–26].

Основными входными данными для работы обоих программных комплексов являются данные о горючем и окислителе. Анализ доступных источников [27, 28] дает точное процентное содержание компонент МАФ газа: (метилацетилен – 45%, пропан – 25,7 %, пропилен – 2,1%, аллен – 25,6%, бутилен – 0,3%, дивинил – 0,2%). Кроме того, в [27] различают две марки (А и Б) МАФ газа. Поэтому в данной работе было принято решение рассматривать МАФ газ как следующую смесь углеводородов (указаны массовые доли):

- 40% – метил-ацетилен (пропин, $\text{CH}_3\text{-C}\equiv\text{CH}$);

- 35% – аллен (пропадиен, $\text{CH}_2=\text{C}\equiv\text{CH}_2$);

- 20% – пропан ($\text{H}_3\text{C-H}_2\text{C-CH}_3$);

- 5% – пропилен ($\text{H}_3\text{C-CH}=\text{CH}_2$).

Согласно [14, 24] был выполнен расчет условной химической формулы МАФ газа для программы TDK. С этой целью были определены

молярные массы и массовые доли (формула 1) составных газов:

$$g_i = \frac{A_i \cdot z_i}{\mu}, \quad (1)$$

где A_i – относительная атомная масса i -го химического элемента; z_i – количество атомов в химической формуле (2); μ – относительная молекулярная масса всего вещества.

$\mu(C_3H_4) = 12 \cdot 3 + 1 \cdot 4 = 40$; $g(C_3H_4) = 0,75$;
 $(C_3H_8) = 12 \cdot 3 + 8 \cdot 4 = 44$; $g(C_3H_8) = 0,2$;
 $(C_3H_6) = 12 \cdot 3 + 6 \cdot 4 = 42$; $g(C_3H_6) = 0,05$;
 тогда
 $g(H) = 0,75 \cdot 1 \cdot 4 / 40 + 0,2 \cdot 1 \cdot 8 / 44 + 0,05 \cdot 1 \cdot 6 / 42 = 0,12$;
 $g(C) = 0,75 \cdot 12 \cdot 3 / 40 + 0,2 \cdot 12 \cdot 3 / 44 + 0,05 \cdot 12 \cdot 3 / 42 = 0,88$;

$$z_i = \mu \frac{g_i}{A_i}. \quad (2)$$

Таким образом, условная формула МАФ газа – $C_{7,333}H_{11,829}$, где $z(C) = 7,333$; $z(H) = 11,829$.

Далее рассчитываем энтальпию и плотность горючего газа по методике [24]. Данные по энтальпиям углеводородов взяты из [19, 20].

Модель сгорания топлива в наружной камере с тарельчатым соплом со свободным внутренним расширением

Моделирование процессов сгорания горючей смеси и истечения продуктов сгорания из тарельчатого сопла со свободным внутренним расширением выполнено в программных комплексах TDK

и RPA. В качестве результирующих показателей рассматриваются термодинамические показатели продуктов сгорания в выходном сечении тарельчатого сопла. Так как, согласно условиям моделирования, коэффициент избытка окислителя для наружного сопла должен обеспечить максимальную скорость истечения продуктов сгорания из сопла, то вначале были проведены расчеты в программе RPA, с целью определения оптимального коэффициента избытка окислителя – $\alpha = 0,538$.

Далее были проведены расчеты в программе TDK для полученного выше значения α с целью получения термодинамических показателей продуктов сгорания. Результаты моделирования приведены в таблице 1.

Для последующих расчетов принимаются песимистические оценки, полученные с помощью программы TDK.

Модель сгорания топлива во внутренней камере

Внутренняя камера сгорания представляет собой канал с расходным воздействием на поток, включающий узел подвода окислителя, напыляемого материала, два узла форсунок подвода топлива и камеры между этими узлами. Модель подобной горелки детально описана в [8]. Схематически внутренняя камера представлена на рис. 1. Длина участка от первого узла подвода топлива до второго обозначена L_1 , от второго до выхода из сопла – L_2 , d – диаметр внутренней камеры горелки. Подача порошка осуществляется вдоль оси внутренней камеры.

Таблица 1 – Термодинамические показатели продуктов сгорания

Термодинамические показатели	Обозначение, единицы измерения	TDK	RPA
температура	T, К	2716,7	2837,733
давление	P, МПа	0,1	0,1
молекулярная масса	M, кг/моль	20,538	20,292
газовая постоянная	R, кДж/(кг·К)	0,4048	0,4097
плотность	ρ , кг/м ³	0,091	0,086
скорость истечения	W, м/с	1990,1	2039,975
отношение диаметра выходного сечения сопла к критическому	$d_{\text{вых}}/d_{\text{кр}}$	1,229	1,52
число Маха	M	1,763	1,762
вязкость продуктов сгорания в выходном сечении сопла	η , Н·м/с	$7,84 \cdot 10^{-5}$	-
теплопроводность продуктов сгорания в выходном сечении сопла	λ , Вт/(м·К)	$3,13 \cdot 10^{-1}$	-
теплоемкость продуктов сгорания в выходном сечении сопла	C_p , кДж/(кг·К)	3,84	4,8297
показатель изэнтропической адиабаты	γ	1,117851861	1,1713

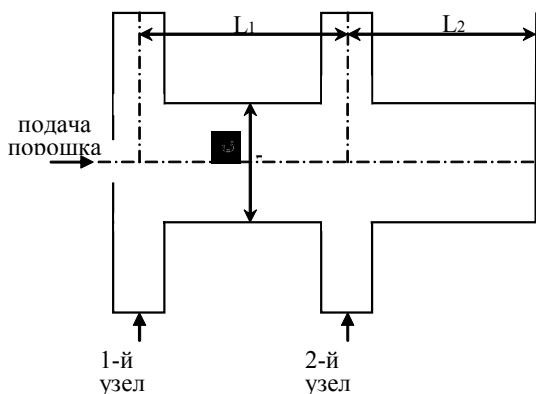


Рис. 1. Геометрия внутренней камеры с двумя узлами подвода горючего

При принятых допущениях, потерями на промежутках между этими узлами можно пренебречь, поэтому далее этапы разгона и нагрева моделируются последовательно.

При заявленных в начальных условиях давлениях в камере сгорания (0,3 МПа) и окружающей среды на ее выходе (0,1 МПа) течение внутри камеры будет проходить в надкритическом режиме. Это подтверждается проверкой соотношения [8]:

$$P = \frac{p_1^*}{p_2} < P_k = \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}} \approx 1,893. \quad (3)$$

Таким образом, для расчетов используются программы TDK и RPA, а в качестве результирующих показателей рассматриваются термодинамические показатели продуктов сгорания в «критическом сечении» сопла.

Так как согласно начальным условиям во внутренней камере обеспечен режим максимальной температуры сгорания, то вначале был определен коэффициент избытка окислителя для такого режима. Его значение $\alpha = 0,765$. Далее, на интервале размещения внутренней камеры сгорания, были получены данные об изменении термодинамических параметров газового потока (скорость, температура, плотность, вязкость, теплопроводность, теплоемкость). Динамика их изменения показана в таблице 2 и на рисунке 2. По данным таблицы и рисунка хорошо видно увеличение температуры и скорости продуктов сгорания во втором узле подвода горючего и окислителя, что дает нам дополнительные возможности в управлении параметрами процесса напыления.

Таблица 2 – Динамика изменения термодинамических параметров во внутреннем сопле горелки

X, м	Скорость газа, W, м/с	Температура газа, T, К	Плотность газа, ρ , кг/м ³	Теплопроводность газа, λ , Вт/(м·К)	Вязкость газа, η , Н·м/с	Теплоемкость газа, c_p , кДж/(кг·К)
0	25	298,1	1,52118	0,2579	0,0000178	9,19
0,0012	1140,6	3210,8	0,149800391	0,312	0,0000899	11,1
0,1192	1140,6	3210,8	0,149800391	0,312	0,0000899	11,1
0,1204	1258,811	3456,399	0,1236	0,3533	0,0000945	14,38
0,1956	1258,811	3456,399	0,1236	0,3533	0,0000945	14,38

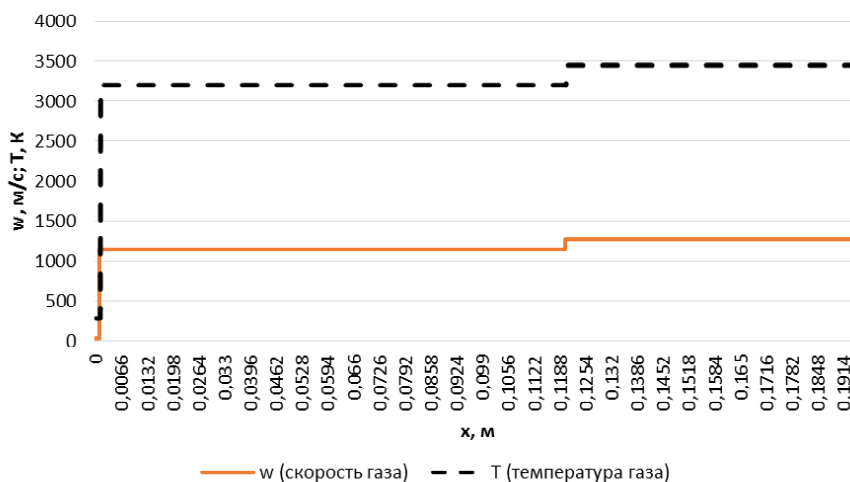


Рис. 2. Динамика изменения скорости и температуры продуктов сгорания вдоль оси внутреннего сопла

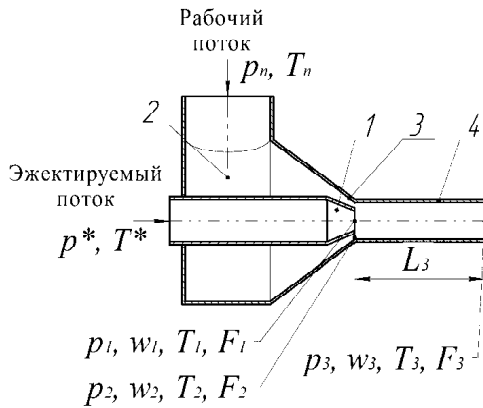


Рис. 3. Модель эжектора с цилиндрической камерой смешения без выходного диффузора

Входные данные для расчета (рис. 3) эжектора сведены в таблицу 3.

Далее выполняется последовательный расчет термодинамических параметров потоков эжектора.

Основным геометрическим параметром эжектора является отношение площадей выходных сечений сопел для рабочего и эжектируемого потока

$$\alpha = \frac{F_1}{F_2} = \frac{F_1}{F_3 - F_1} \quad (4)$$

В наших расчетах $\alpha = 7,101$. Для рабочего и эжектируемого потоков рассчитывается:

T^* – абсолютная температура заторможенного газа:

$$T^* = T + \frac{w^2}{2c_p} \quad (5)$$

$a_{кр}$ – скорость звука в критическом сечении:

$$a_{кр} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \cdot R \cdot T^*} \quad (6)$$

Относительная скорость λ :

$$\lambda = \frac{w}{a_{кр}} \quad (7)$$

p^* – абсолютное давление заторможенного газа Па;

$$\pi(\lambda) = \frac{p}{p^*} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (8)$$

Для выходного потока рассчитывается p_3^* абсолютное давление заторможенного газа, Па:

$$p_3^* = \frac{\alpha \cdot p_1^* + p_2^*}{1 + \alpha} \quad (9)$$

$$p_3^* = 342127,067 \text{ Па.}$$

Для рабочего и эжектируемого потоков рассчитывается параметр m :

$$m = \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (10)$$

расход (G):

$$G_1 = \sigma_1 \cdot m \cdot \frac{p^* \cdot F_1}{\sqrt{T_1^*}} \quad (11)$$

Для выходного потока рассчитывается расход G_3 : $G_3 = G_1 + G_2 = 0,212$ (кг/с).

Рассчитывается коэффициент эжекции $n = G_2/G_1 = 0,255$.

Для выходного потока рассчитывается T_3^* – абсолютная температура заторможенного газа из формулы (12), К:

$$R_c = \frac{R_a + KR_{II}}{1 + K} \quad (12)$$

Таблица 3 – Входные данные для расчета эжектора

Параметр	Единицы измерения	Эжектируемый газ (внутреннее сопло)	Рабочий (высоконапорный, эжектирующий) поток (наружное сопло)
Давление, р	МПа	0,1737	0,1
Температура, Т	К	3456,399	2716,7
Удельная теплоемкость (р = const), Ср	кДж/(кг·К)	14,38	3,84
Показатель адиабаты, k=c _p /c _v	-	1,2396	1,1713
Газовая постоянная, R	кДж/(кг·К)	0,4066	0,40484
Плотность, ρ	кг/м ³	0,1236	0,090922812
Скорость, w	м/с	1258,811	1990,1
Площадь сечения, F	м ²	0,000994115	0,00014
Коэффициент восстановления давления, σ		0,99	0,99

$$T_3^* = 3454,751 \text{ К.}$$

По формуле (13) рассчитывается соотношение температур торможения:

$$\Theta = \frac{T_2^*}{T_1^*}. \quad (13)$$

Получим $\Theta = 0,9205$. Для рабочего и эжектируемого потоков по формуле (14) рассчитывается газодинамическая функция $z(\lambda)$:

$$z(\lambda_2) = \lambda_2 + \frac{1}{\lambda_2}. \quad (14)$$

Для смешанного потока по формулам (15)...(22) рассчитываются, соответственно, газодинамическая функция $z(\lambda_3)$, приведенная скорость (λ_3), скорость звука в критическом сечении $a_{кр.3}$, скорость выходного потока w_3 , удельная теплоемкость на выходе при постоянном давлении c_{p3} , газовая постоянная на выходе $R_3 = R_c$, температура газа на выходе:

$$z(\lambda_3) = \frac{z(\lambda_1) + z(\lambda_2) \cdot n \sqrt{\Theta}}{\sqrt{(n+1) \cdot (1+n\Theta)}}; \quad (15)$$

$$z(\lambda_3) = 2,053;$$

$$\lambda_3 = \frac{z(\lambda_3)}{2} - \sqrt{\left(\frac{z(\lambda_3)}{2}\right)^2 - 1}; \quad (16)$$

$$\lambda_3 = 1,259;$$

$$\frac{a_{кр.3}}{a_{кр.1}} = \sqrt{\frac{n \cdot \Theta + 1}{n + 1}} \quad (17)$$

$$a_{кр.3} = 1246,989;$$

$$w_3 = \lambda_3 \cdot a_{кр.3}; \quad (18)$$

$$w_3 = 1569,715 \text{ м/с};$$

$$G_3 c_{p3} T_3^* = G_1 c_{p1} T_1^* + G_2 c_{p2} T_2^*; \quad (19)$$

$$c_{p3} = 12375,025;$$

$$R_c = \frac{R_a + KR_{II}}{1 + K}, \quad (20)$$

$$K = \frac{G_{II}}{G_a}, \quad (21)$$

где R_a , R_{II} , R_c – газовые постоянные соответственно активного, пассивного газов и их смеси.

$$R_3 = 0,406 \text{ кДж/(кг·К)};$$

$$T_3^* = T_3 + \frac{w_3^2}{2c_{p3}}, \quad (22)$$

$$T_3 = 3355,196 \text{ К.}$$

Показатель изэнтропической адиабаты на выходе (24) определим из формулы (23):

$$a_{кр.3} = \sqrt{\frac{2k_3}{k_3 + 1} R_3 T_3^*}; \quad (23)$$

$$k_3 = \frac{a_{кр.3}^2 / R_3 T_3^*}{2 - a_{кр.3}^2 / R_3 T_3^*}; \quad (24)$$

получим $k_3 = 1,242$.

Давление газа на выходе определим из формулы (25):

$$\pi(\lambda_3) = \frac{p_3}{p_3^*} = \left(1 - \frac{k_3 - 1}{k_3 + 1} \lambda_3^2\right)^{\frac{k_3}{k_3 - 1}}; \quad (25)$$

получим $p_3 = 130638,206 \text{ Па}$.

Из уравнения Менделеева-Клайперона находим плотность газа (26):

$$\rho_3 = \frac{p_3}{R_3 \cdot T_3}; \quad (26)$$

получим $\rho_3 = 0,0958 \text{ кг/м}^3$.

Для определения параметров вязкости и теплопроводности газа после смешения в эжекторе в работе использована методика, изложенная в [16]. Согласно ей, результирующий показатель определяется пропорционально показателю расхода потоков G (27)...(29):

$$\eta_3 = \frac{\eta_2 + n \cdot \eta_1}{1 + n}; \quad (27)$$

$$\lambda_3 = \frac{\lambda_2 + n \cdot \lambda_1}{1 + n}; \quad (28)$$

$$n = \frac{G_2}{G_1}. \quad (29)$$

Результаты расчетов эжектора сведены в таблицу 4.

Из таблицы 4 видно, что у результирующего потока продуктов сгорания выросла температура, по сравнению с потоком из наружного тарельчатого сопла, и скорость истечения, по сравнению со скоростью потока из внутреннего сопла.

Во второй части будет выполнено моделирование движения газового потока на участке от выхода из камеры смешения эжектора до подложки и представлена обобщающая модель движения частиц напыляемого порошка карбида хрома размером 40 мкм с момента его поступления в газовый тракт горелки и до подложки.

Выводы

Таким образом, в результате проделанной работы разработана математическая модель процесса течения продуктов сгорания внутри газового тракта двухкамерной горелки оригинальной конструкции для сверхзвукового газоплазменного напыления. В качестве компонентов горючего использовались МАФ-газ и кислород. Результаты исследования и расчетов позволили определить функции скорости и температуры продуктов сгорания от начала газового тракта внутренней камеры горелки и до выхода из камеры смешения двух потоков эжектора.

Разработанная математическая модель представляет большой интерес с точки зрения прогнозирования важных для эксплуатации деталей с напыленным покрытием параметров, таких как адгезия, когезия и пористость, получаемых с использованием горелки, описанной выше конструкции.

Дальнейшая работа будет посвящена моделированию течения продуктов сгорания от среза камеры смешения горелки до подложки и описанию изменения скорости и температуры частиц напыляемого материала в тракте горелки и на участке от среза камеры смешения до подложки.

Таблица 4 – Результаты расчета параметров потока на выходе из эжектора (камеры смешения)

Параметр	Единицы измерения	Эжектируемый газ (внутреннее сопло)	Рабочий (высоконапорный, эжектирующий) поток (наружное сопло)	Выходной поток
Давление, p	МПа	0,174	0,1	0,131
Температура, T	К	3456,399	2716,7	3355,196
Удельная теплоемкость (p = const), c _p	кДж/(кг·К)	14,380	3,84	12,375
Показатель адиабаты, k=c _p /c _v		1,240	1,171	1,242
Газовая постоянная, R	кДж/(кг·К)	0,407	0,405	0,406
Плотность, ρ	кг/м ³	0,124	0,091	0,096
Скорость, w	м/с	1258,811	1990,1	1569,715
Площадь сечения, F	м ²	0,000994	0,00014	0,001134
Расход, G	кг/с	0,169	0,043	0,212
Вязкость продуктов сгорания в выходном сечении сопла, η	Н·м/с	9,45·10 ⁻⁵	7,84·10 ⁻⁵	8,167·10 ⁻⁵
Теплопроводность продуктов сгорания в выходном сечении сопла, λ	Вт/(м·К)	0,353	0,313	0,321

Список литературы

1. Fauchais Thermal spray fundamentals. From powder to part / Pierre L. Fauchais, Joachim V.R. Herberlein, Maher I. Boulos. — New York: Springer, 2014. — 1566.
2. Armelle Vardelle The 2016 Thermal Spray Roadmap / [Armelle Vardelle, Christian Moreau, Jun Akedo et al.] // Journal of Thermal Spray Technology, Volume 25(8). — December 2016. — P. 1376–1440.
3. Горелочное устройство двухкаскадной конфигурации для высокоскоростного воздушно-топливного напыления на жидком топливе / Ю.И. Евдокименко, В.М. Кисель, Г.А. Фролов, С.В. Бучаков // Вестник двигателестроения. — 2015. — №2. — С. 143–148.
4. Korobov Yu.S. Deposition of protective coatings by means of supersonic flame spraying / Korobov Yu.S. // Thermal engineering; vol 56, N 2, 2009. — P. 142–146.
5. DE з. 102009051948, МПК В05В 7/20, С23С 4/12, Способ и горелка для нанесения покрытий, Thermico GmbH & Co. KG (DE), №, дата подачи 102009051948.3, 04.11.2009; Дата публ. 05.05.2011
6. Пат. Украины 90044, МПК (2006) В05В 7/00. Газополуменивый палец для надзвукового напыления покрытий / Долматов А.И., Зорик И.В., Данько К.А.; заявитель и патентообладатель Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». — №а200809654; заявл. 25.01.2010, бюл. №2; опубл. 25.03.2010, бюл. № 6. — 6 с.: ил.
7. Вопнерук А. А. Совершенствование технологии высокоскоростного газопламенного напыления износостойких покрытий со структурой метастабильного аустенита: дис. ... канд. техн. наук : 05.02.10 / Ур. федер. Ун-т им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. Екатеринбург. — 2011. — 178 с.
8. Тимошенко В. И. Газовая динамика высокотемпературных технологических процессов: монография / Тимошенко В.И. — Днепрпетровск : Ин-т технической механики НАНУ и НКАУ. — 2003. — 460 с.
9. Вопросы математического моделирования и экспериментальной обработки газодинамических и теплообменных процессов в горелочных устройствах для высокоскоростного газопламенного напыления / В.И. Тимошенко, В.П. Галинский, И. С. Белоцерковец и др. // Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси: IV Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer. — May 22–26, 2000. — Т. 4. — С. 261–268.
10. Горелочное устройство двухкаскадной конфигурации для высокоскоростного воздушно-топливного напыления на жидком топливе / Евдокименко Ю.И., Кисель В.М., Фролов Г.А., Бучаков С. В. // Вестник двигателестроения. — 2015. — №2. — С. 143–148.
11. Евдокименко Ю. И. Исследование газодинамических трактов генераторов двухфазных потоков с расходным управлением их параметрами / Евдокименко Ю.И., Кисель В.М., Тимошенко В. И. // Авіаційно-космічна техніка і технологія. — 2003. — №6. — С. 83–87.
12. Евдокименко Ю. И. Энергетическая эффективность горелок для высокоскоростного газопламенного напыления / Евдокименко Ю.И., Кисель В.М., Фролов Г.А // Авиационно-космическая техника и технология. — 2011. — №7. — С. 12–17.
13. Дорофеев А. А. Основы теории тепловых ракетных двигателей. Теория, расчет и проектирование: учебник / Дорофеев А.А., 3-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2014. — 571, [5] с.
14. Шишкин А.С. Примеры расчетов аэродинамических процессов переработки сыпучих материалов в Excel [Электронный ресурс]. URL: <http://study.urfu.ru/> (дата обращения 10.05.2017).
15. Кинематика твердой частицы, разгоняемой потоком газа в сверхзвуковом сопле, и деформационное упрочнение обработанной поверхности / Долматов А.И., Сергеев С.В., Курин М.А. и др. // Металлофизика и новейшие технологии. — 2015. — Т. 37, №7. — С. 871–885.
16. Цегельский В.Г. К теории газовых эжекторов с цилиндрической и конической камерами смешения / Цегельский В. Г. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2012. — № 2 — С. 46–71.
17. Математическая модель сверхзвукового воздушно-плазменного напыления / Головин С.И., Аверченко В. А., Попович Л.Г., Пузряков А.Ф. // Сварочное Производство. — 2008. — №2. — С.16–22.
18. Li, Mingheng; Christofides, Panagiotis D. Modeling and Control of High-Velocity Oxygen-Fuel (HVOF) Thermal Spray: A Tutorial Review. // Journal of Thermal Spray Technology. — 2009. №18(5).pp. 849 – 857.
19. Новый справочник химика и технолога. Основные свойства неорганических, органических и элементоорганических соединений / под общ. ред. Н. К. Скворцова. — С.-Пб.: АНО НПО «Мир и Семья», 2002. — 1280 с.
20. Новый справочник химика и технолога. Общие сведения. Строение вещества. Физические свойства важнейших веществ. Аромати-

- ческие соединения. Химия фотографических процессов. Номенклатура органических соединений. Техника лабораторных работ. Основы технологии. Интеллектуальная собственность / Бибик Е. Е. и др. – СПб. : НПО «Профессионал», 2006. – 1464 с.
21. Турчанин А.В. Термодинамика тугоплавких карбидов и карбонитридов / Турчанин А. В., Турчанин М. А. – М. : Металлургия, 1991. – 352 с.
 22. Зорик И. В. Газопламенная горелка для сверхзвукового напыления покрытий / Зорик И. В. Данько К. А. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – № 1. – С. 11–15.
 23. Соколов И. О. Технология упрочнения тяжело нагруженных деталей газотермическим напылением: монография / Соколов И. О. Спиридонов Н. В., Нерода М. В. – Барановичи: РИО БарГУ. – 2012. – 184 с.
 24. Завитковский Д. Определение массового состава топливных компонентов [Электронный ресурс]. URL: <http://rocketengines.ru/rocket-engines-studying/practice/chamber-computation/lesson-one.html> (дата обращения 10.03.2017).
 25. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.propulsion-analysis.com/index.htm> (дата обращения 10.03.2017).
 26. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dosbox.com/> (дата обращения 10.03.2017).
 27. [Электронный ресурс]. URL: https://tgko.ru/spravka/gaz/metilacetilen-allenovaya_frakciya_maf/ (дата обращения 10.03.2017).
 28. [Электронный ресурс]. URL: <http://gazmaf.by/media/48600/pdk-maf.doc> (дата обращения 10.03.2017).
 29. Миллионщиков М. Д. Сборник работ по исследованию сверхзвуковых газовых эжекторов / Миллионщиков М. Д., Рябинков Г. М. – БНИ ЦАГИ. – Харьков, 1961. – 327 с.

Поступила в редакцию 25.05.2017

Данько К.А. Моделирование течи газа всередині тракту двокамерного пальника для надзвукового газополуменевго напыления покрыттів

Наведено математичну модель, що описує зміни швидкості і температури продуктів згорання в тракті двокамерного пальника для надзвукового газополуменевго напылення. В якості компонентів палива в розрахунках прийнято МАФ-газ і кисень. Отримані результати показують, що завдяки оригінальній конструкції пальника вдалося розділити ділянки нагріву та прискорення частинок напылюваного матеріалу, істотно поліпшивши умови для теплової релаксації частинок, а також розширивши можливості управління процесом напылення, при цьому, не збільшуючи габаритних розмірів пальника і виключаючи ділянки, газового тракту, що звужуються, по ходу руху розплавлених частинок.

Ключові слова: надзвукове газополуменеве напылення, двокамерний пальник, математична модель, тарільчатє сопло з вільним розширенням, ежектор, коефіцієнт надлишку окислювача, термодинамічні показники, потік, що ежектуються.

Danko K. Simulation of gas flow inside double-chamber burner passage for supersonic gas-flame spraying

A mathematical model of the combustion products velocity and temperature changes in the twin-combustion-chamber HVOF burner path is given. MAPG gas and oxygen were taken as components of the fuel in the calculations. The obtained results show that thanks to the original design of the burner, it became possible to separate its heating and acceleration paths. Thus, particles of the sprayed material has better conditions for thermal relaxation and another positive aspect is in expanding the control capabilities of the spraying process without increasing the overall dimensions of the burner and eliminating the narrowing sections of the gas path of the molten particles.

Key words: high velocity gas-thermal spraying, twin-combustion-chamber burner, mathematical model, free internal jet expansion radial outflow type nozzle, eductor, excess oxidant ratio, thermodynamic properties, entrained flow.