

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭНЕРГЕТИКИ

УДК 621.791.011

В.А. ГУГЛЯ, И.И. ЖУКОВСКИЙ,
А.С. ЛАЗАРЕВ, канд. техн. наук (БПИ),
А.И. МИХАЛЬКЕВИЧ (БР НПО ПМ)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ГАЗОПЛАМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Технология газопламенного нанесения покрытий имеет ряд преимуществ перед плазменным и детонационным методами напыления. Эффективность указанного метода в значительной степени определяется качеством протекания реакции горючее-кислород. Наличие напыляемой поверхности перед горелкой приводит к неполному сгоранию топлива, и часть его не успевает вступить в реакцию с кислородом. Увеличение расстояния между горелкой и напыляемой поверхностью способствует улучшению качества сгорания, но приводит к уменьшению температуры порошка при подлете к подложке, что ухудшает качество сцепления покрытия с деталью.

Схема газопламенного напыления показана на рис. 1. Горючее поступает по оси цилиндрической камеры, а окислитель (кислород) — по кольцу r_1, r_2 . Горелка снабжена заслонкой, которая закручивает газовый поток.

Система уравнений, по которым описывается движение газовой смеси с реакцией горения, имеет вид [1]:

$$\delta(\rho u)/\delta x + \delta(\rho v)/\delta y + \delta(\rho w)/\delta z = 0, \quad (1)$$

$$\rho u \frac{\delta u}{\delta x} + \rho v \frac{\delta u}{\delta y} + \rho w \frac{\delta u}{\delta z} = \frac{\delta}{\delta y} \left(\mu_{\text{эф}} \frac{\delta u}{\delta y} \right); \quad (2)$$

$$\rho u \frac{\delta h}{\delta x} + \rho v \frac{\delta h}{\delta y} + \rho w \frac{\delta h}{\delta z} = \frac{\delta}{\delta y} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\delta h}{\delta y} \right) + \frac{1}{\rho u} \frac{\delta}{\delta y} \left[\lambda (Pr - 1) \frac{\delta (u^2/2)}{\delta y} \right]; \quad (3)$$

$$\rho u \frac{\delta c_{\text{гор}}}{\delta x} + \rho v \frac{\delta c_{\text{гор}}}{\delta y} + \rho w \frac{\delta c_{\text{гор}}}{\delta z} = \frac{\delta}{\delta y} \left(\rho \frac{\delta c_{\text{гор}}}{\delta y} \right) - k p^2 c_{\text{гор}} c_{\text{ок}} e^{\frac{-E}{RT}}; \quad (4)$$

$$\rho u \frac{\delta c_L}{\delta x} + \rho v \frac{\delta c_L}{\delta y} + \rho w \frac{\delta c_L}{\delta z} = \frac{\delta}{\delta y} \left(\rho \frac{\delta c_L}{\delta y} \right); \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\delta k}{\delta x} + \rho v \frac{\delta k}{\delta y} + \rho w \frac{\delta k}{\delta z} &= \frac{\delta}{\delta y} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\delta k}{\delta y} \right) + \\ + \mu_T \left(\frac{\delta u}{\delta y} \right)^2 - \rho \epsilon + c_3 \rho \beta \sqrt{k T_s^2}; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\delta \epsilon}{\delta x} + \rho v \frac{\delta \epsilon}{\delta y} + \rho w \frac{\delta \epsilon}{\delta z} &= \frac{\delta}{\delta y} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \frac{\delta \epsilon}{\delta y} \right) + \mu_T c_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \left(\frac{\delta u}{\delta y} \right)^2 - \\ - c_{\epsilon 2} \frac{\epsilon}{k} \rho \epsilon + c_4 \frac{\epsilon}{k} \rho \beta \sqrt{k T_s^2}; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\delta T_s^2}{\delta x} + \rho v \frac{\delta T_s^2}{\delta y} + \rho w \frac{\delta T_s^2}{\delta z} &= \frac{\delta}{\delta y} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_T} \frac{\delta T_s^2}{\delta y} \right) + \\ + c_{T1} \frac{\epsilon}{k} \mu_T \left(\frac{\delta T}{\delta y} \right)^2 - c_{T2} \frac{\epsilon}{k} \rho T_s^2; \end{aligned} \quad (8)$$

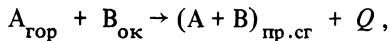
$$p_i = \frac{\rho_i}{m_i R T_i}; \quad (9)$$

$$\mu_{эф} = \mu + c_\mu p \frac{k^2}{\epsilon}, \quad (10)$$

где $h = c_p T + Q c_T$ – энтальпия; Q – тепловой эффект сгорания топлива; $c_{гор}$, $c_{ок}$ – массовая концентрация горючего и окислителя; $c_L = c_{ок} - \sigma c_{гор}$ – переменная Шваба–Зельдовича; σ – коэффициент стехиометрии; k , ϵ – энергия и скорость диссипации турбулентного движения; T_s^2 – средний квадрат пульсационной температуры; β – коэффициент теплового расширения; m_i – молекулярная масса i -го компонента. Обозначения остальных переменных стандартны.

В уравнениях (1)...(10) использована трехпараметрическая модель турбулентности $k - \epsilon - T_s^2$.

Реакция горения имеет вид



где $A_{гор}$ – горючее; $V_{ок}$ – окислитель; $(A + B)_{пр.сг}$ – продукты сгорания; Q – выделяемое количество теплоты.

Константы σ_k , σ_ϵ , c_μ , $c_{\epsilon 1}$, $c_{\epsilon 2}$, c_3 , c_4 , c_{T1} и c_{T2} табличные или вычисляются. В частности, в данной работе большая часть перечисленных коэффициентов рассчитывалась на ЭВМ по программе, приведенной в монографии [2].

Система уравнений (1)...(10) решена численно на ЭВМ введением новых переменных: ω (напряженность вихря) и ψ (функция тока). Для реализации алгоритма на ЭВМ был частично использован известный пакет программ Сполдингга [3]. Эффективная вязкость смеси вычислялась по формуле

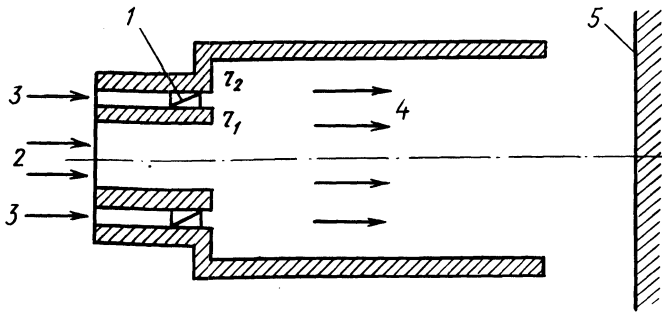


Рис. 1. Камера газопламенного напыления:

1 – закручивающее устройство; 2, 3, 4 – потоки горючего, окислителя и продуктов сгорания; 5 – напыляемая подложка.

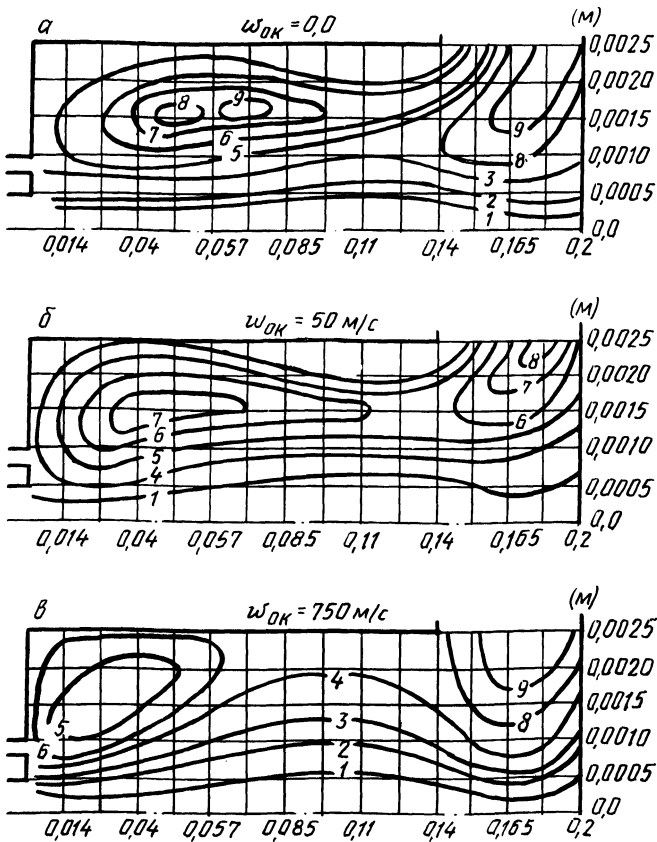


Рис. 2. Линии тока при разных скоростях закручивания потока:

1 – $-0,023$; 2 – $-0,013$; 3 – $-0,011$; 4 – $-0,0054$; 5 – $0,0$; 6 – $0,0063$; 7 – $0,0096$; 8 – $0,025$; 9 – $0,06$.

$$\mu = \alpha R_k^m h_k^n \rho^l \left(\frac{dm_{\text{гор}}}{dt} v_{\text{гор}}^2 + \frac{dm_{\text{ок}}}{dt} v_{\text{ок}}^2 \right)^g, \quad (11)$$

где α , m , n , l , g – постоянные коэффициенты; R_k – радиус камеры; h_k – расстояние от сопла до напыляемой стенки.

На рис. 2, *a–в* приведены линии тока течения газовой смеси для различных значений тангенциальной составляющей скорости w_0 . На данном рисунке иллюстрируется процесс образования вихря в угловой части камеры, размеры которой уменьшаются по мере роста w_0 . Следовательно, при небольших значениях w_0 цилиндрическая насадка на газопламенной горелке играет роль защитного экрана, не позволяющего холодному окружающему воздуху проникать в факел. По мере увеличения w_0 роль насадки уменьшается. На рис. 3, *a–в* анализируется форма факела пламени для различных значений

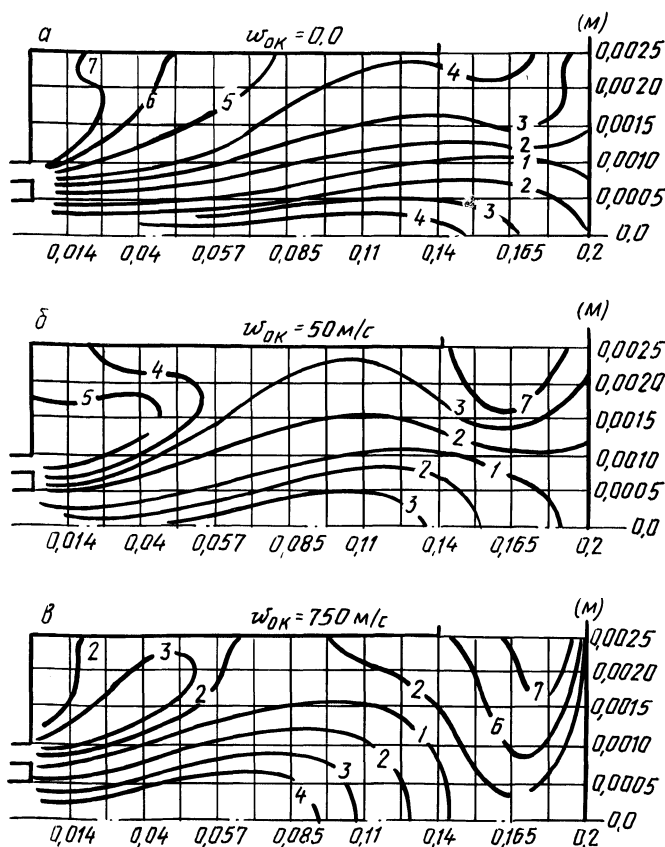


Рис. 3. Температурное поле при разных скоростях закручивания потока:

1 – 2590 °С; 2 – 2200; 3 – 1970; 4 – 1820; 5 – 1670; 6 – 1420; 7 – 1270 °С.
1 – поверхность факела пламени (изотерма максимальной температуры).

w_0 . Изменение скорости закручивания потока значительно влияет на форму факела пламени: при $w_0 = 0,25v_{гор}$ горючее не успевает полностью сгореть, при $w_0 = 5v_{гор}$ факел пламени резко укорачивается. Следовательно, увеличение скорости закручивания при подаче окислителя позволяет создавать укороченный факел пламени. Отметим также, что дальнейшее увеличение w_0 приводит к возникновению возвратных течений в ядре пламени. Данный факт отрицательно сказывается на качестве напыления, поскольку при этом скорость частиц порошка уменьшается.

Проведенное теоретическое исследование на математической модели позволяет сделать вывод об эффективности управления размерами факела пламени в газопламенном напылении изменением степени закручивания потока окислителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. А р т ю х Л.Ю., К а ш к а р о в В.П., Л о к т и о н о в Н.В. Численное исследование турбулентного диффузионного горения на вертикальной поверхности // ФГВ. — 1985. — № 3. — С. 8–14.
2. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов / Г.Б. Синирев, Н.А. Ватолин, Б.Г. Трусов, Г.К. Моисеев. — М.: Наука, 1982. — 261 с.
3. S p a l d i n g P.B. GENMIX: A General Computer Program for Two-dimensional Parabolic Phenomena Pergamon Press, 1977.

УДК 658.382.3:621.31

Т.Г. ПОСПЕЛОВА, канд. техн. наук,
С.М. НАЙДОВИЧ (БПИ)

О РАСПОЗНАВАНИИ И ПРЕДУПРЕЖДЕНИИ ЭЛЕКТРООПАСНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Интенсивное развитие электрических сетей выявило ряд серьезных проблем их эксплуатации. Одна из важнейших среди них — повышение ее безопасности.

Электроэнергетическое производство, включая передачу и распределение электроэнергии, относится к группе производств, абсолютную безопасность которых по одним факторам (опасность поражения электрическими током, дугой) достичь невозможно, а по другим (влияние электромагнитного поля) — нецелесообразно. В современных энергосистемах возрастает значение таких ценностных факторов, как экономичность, надежность, безаварийность. Это обуславливает поиск необходимого и достаточного уровня безопасности электрических сетей.

В известной работе [1] ретроспективный анализ электробезопасности, выполненный на основе обработки большого статистического материала по уже происшедшим фактам поражения электрическим током, результатов инструментальных и теоретических исследований, позволил вскрыть биологическую сущность электротравматизма, определить организационные и технические мероприятия его предупреждения.

Однако в настоящее время объективные причины привели к отставанию