

УДК 621.181.662.9

А. В. Тымчик, канд. техн. наук

Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного НАН Украины
(г. Харьков, E-mail: tymhic@mail.ru)

УСЛОВИЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ ПЛАЗМОЙ СВЧ-РАЗРЯДА

Предложены условия стабилизации горения угольной пыли плазмой СВЧ-разряда. Приведена оценка времен пребывания и нагрева частиц угля в плазме разряда. Определены рациональные значения расходов угля и энергозатрат на его поджиг в зависимости от подаваемой в горелку СВЧ- мощности.

Запропоновані умови стабілізації спалювання вугільного пилу плазмою НВЧ-розряду. Наведена оцінка часу перебування та нагрівання частинок вугілля у плазмі розряду. Визначені раціональні значення витрат вугілля та енерговитрат на його підпал в залежності від потужності НВЧ-розряду.

Разработка СВЧ-плазменной технологии сжигания пылеугольной аэросмеси связана с необходимостью повышения эффективности топливоиспользования и улучшения экологических показателей угольных тепловых станций. Важнейшим в отработке этой технологии является исследование и анализ процессов взаимодействия СВЧ-разряда и аэрозольного потока. Предполагается, что в этом случае воспламенение топлива будет происходить прежде всего за счет теплового воздействия плазмы на мелкодисперсные угольные частицы.

В работе [1] предложено проводить анализ механизма воспламенения угольной пыли в СВЧ-плазме, основываясь на «цилиндрической» модели разряда и предположении, что СВЧ-мощность, поглощенная разрядом, остается неизменной как для «чистой» воздушной плазмы, так и при введении в нее пылевого потока. В этом случае удалось объяснить существенную разницу в эффективности воспламенения бурого угля и антрацита одинаковой дисперсности, отмечавшуюся в работе [2], однако ответ на вопрос, как обеспечить одинаковые условия стабилизации горения углей разных марок, остался открытым. Рассмотрим еще раз физическую модель СВЧ-разряда в потоке угольного аэрозоля. Для СВЧ-плазмотронов на основе круглых волноводов имеет место следующее равенство[3]:

$$L = 2K^n W, \quad (1)$$

где L – погонная мощность (мощность вводимая в разряд на единицу его длины), Вт/см, K^n – постоянная затухания СВЧ-волны определенного типа, распространяющаяся вдоль плазменного канала, см^{-1} , W – СВЧ-мощность подводимая к разряду. Для стационарных условий горения разряда [4]

$$L \approx \left(\frac{8\pi \cdot \kappa \cdot \lambda \cdot T}{I} \right) T = 2K^n \cdot W, \quad (2)$$

$$T = \sqrt{\frac{W \cdot K^n \cdot I}{4\pi \kappa \cdot \lambda}},$$

где $\kappa = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; λ – теплопроводность плазмы, Вт/см·К; T – температура равновесной плазмы, К; I – потенциал ионизации воздуха, Дж.

Как и для плазменно-дуговой подсветки [5], будем считать, что эффективная стабилизация горения угольной пыли возможна тогда, когда выделившееся в СВЧ- разряде джоулево тепло способно обеспечить нагрев до температуры воспламенения ($T_v \sim 1073$ К) не менее 20% массы пыли, проходящей через зону энерговыделения (скин-слой) разряда. В этом случае можно предложить следующие условия стабилизации горения угольной пыли:

- времена нагрева (τ_n) частиц пыли с диаметром d (≈ 100 мкм) до температуры воспламенения должны быть меньше времени пребывания частиц в зоне энерговыделения разряда ($\tau_{пр}$);
- СВЧ-мощность, подводимая к разряду, должна быть больше необходимой для воспламенения массы угля, проходящей через зону энерговыделения;
- конструкция устройства формирования аэрозольного потока должна обеспечивать протекание через зону энерговыделения не менее 20% от расхода угля, проходящего через СВЧ-плазмотрон.

Предполагая, что безградиентный нагрев инертной сухой угольной частицы сферической формы происходит только за счет конвективного теплообмена между частицей и плазмой, теплофизические характеристики и размеры частиц сохраняются неизменными в течение всего времени нагрева, частицы движутся со скоростью воздушного потока, а СВЧ-разряд горит в стационарных условиях, получим из уравнения нагрева частицы [1] следующую зависимость для первого условия стабилизации горения:

$$\tau_n \approx \left(\frac{C \cdot \rho \cdot d}{6Nu \cdot \lambda} \right) dLn \frac{T - T_0}{T - T_в} \leq \frac{V_p}{Q} \approx \tau_{пр}, \quad (3)$$

где C – теплоемкость угля, Дж/кг·К; ρ – плотность угля, кг/м³; T_0 – начальная температура аэрозоля, К; Q – объемный расход воздуха, прокачиваемый через разряд, м³/с; V_p – разрядный объем, определяемый либо в эксперименте как объем ярко светящейся области разряда, либо из соотношения $W = \sigma E^2 V_p$, где σ – проводимость плазмы, ом⁻¹·см⁻¹, E – среднеквадратичная напряженность электрического поля в плазме, В/см.

В интервале температур плазмы, характерных для СВЧ-разрядов в воздухе атмосферного давления, величину проводимости можно определить, пользуясь интерполяционной зависимостью [4]

$$\sigma = 83 \exp(-36000/T), \text{ ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}, \quad (4)$$

а напряженность поля из выражения для плотности потока энергии СВЧ-волны (S , Вт/см²) [4]

$$E = (\mu \cdot S / \sigma)^{0,5} \approx 19,4(S)^{0,5}, \quad (5)$$

$$\mu \approx 2/\delta = 2(\sigma \cdot f)^{0,5} / 5,03, \quad (6)$$

где: μ – коэффициент поглощения СВЧ – волны плазмой, см⁻¹; δ – толщина скин-слоя, см; f – частота СВЧ-волны, МГц.

Используя выражение для погонной мощности $L = 2\pi \cdot r \cdot S$, (r – радиус разряда, $r \approx \delta$ при $\mu \rightarrow \max$ [3]), получим следующую приближенную зависимость для оценки величины поля в разряде:

$$E \approx 19,4(K'' \cdot W / \pi \delta)^{0,5}. \quad (7)$$

Суммируя вышеизложенное, легко сделать вывод о том, что при работе на высоких давлениях плазмообразующего газа (> 600 торр) основной характеристикой, определяющей энергетические параметры СВЧ-плазматрона, является величина постоянной затухания, вычисление которой, особенно для аэрозольной плазмы, представляет собой сложную электродинамическую задачу. Поэтому в последующих расчетных оценках используются значения K'' , взятые из литературных источников для СВЧ-плазматронов, работающих на «чистых» газах [3].

Энергию, необходимую для нагрева аэрозоля, протекающего через зону энерговыделения разряда, до температуры воспламенения угольных частиц можно определить по выражению

$$P \approx 0,2C \cdot T_в \cdot G_y (1 + 1/\eta), \quad (8)$$

где G_y – расход угольной пыли через плазмотрон, кг/с; η – концентрация угольной пыли в транспортирующем воздухе, кг/кг_в; коэффициент 0,2 определяет долю расхода угля, которую необходимо поджечь плазмой СВЧ-разряда для стабилизации горения остальной части аэросмеси. Величина P должна быть не меньше значения W , а точнее $K_n \cdot W$, где K_n – коэффи-

циент поглощения мощности в разряде (при $r \approx \delta$ для СВЧ – плазмотронов, работающих на воздухе, $K_{\text{п}} > 0,9$ [3]).

Основываясь теперь на вышеизложенной методике, определим, какой максимальный расход угля марки АШ могут обеспечить СВЧ-плазменные горелки, оснащенные генераторами мощностью 5 ($f = 2450$ МГц) кВт. Считаем следующие величины постоянными [1, 6, 7] $K_{\text{п}} = 0,9$; $\eta = 5$; $C \approx 1$ кДж/(кг·К); $T_{\text{в}} = 1073$ К; $T_0 = 293$ К; $\rho = 1600$ кг/м³; $\lambda \approx 1,5 \cdot 10^{-2}$ Вт/(см·К) ($T \leq 6000$ К); $d = 100$ мкм; $I \approx 10 \cdot 10^{-19}$ Дж; $Nu = 2$; $K'' \approx 1,5 \cdot 10^{-2}$ см⁻¹.

Тогда последовательно из (1), (2), (4), (6) и (7) получим $T = 5370$ К, $\sigma = 0,1$ ом⁻¹·см⁻¹, $\delta = 0,32$ см, $E \approx 168$ В/см, $V_{\text{р}}$ составит примерно $1,8$ см³, $\tau_{\text{н}}$ из (3) около $0,15$ мс, а $G_{\text{у}}$ из (8) порядка 63 кг/ч, что близко к реально полученной в эксперименте величине [8]. Объемный расход транспортирующего воздуха Q , приведенный к нормальным условиям, составит 10 нм³/ч, а время пребывания частиц угольной пыли в высокотемпературной зоне примерно $0,6$ мс, что значительно превышает время, необходимое для их воспламенения.

Литература

1. Тымчик А. В. Воспламенение угольной пыли плазмой СВЧ-разряда / А. В. Тымчик // Пробл. машиностроения. – 2009. – 7, № 3. – С. 77–82.
2. Канило П. М. СВЧ-плазменная технология сжигания низкосортных углей / П. М. Канило, В. Е. Костюк, А. В. Тымчик и др. // Пробл. машиностроения. – 2004. – Т. 7, № 2. – С. 72–77.
3. Дресвин С. В. ВЧ- и СВЧ-плазмотроны (Низкотемпературная плазма; Т. 6) / С. В. Дресвин, А. А. Бобров, В. М. Лелевкин и др. – Новосибирск: Наука, 1992. – 319 с.
4. Райзер Ю. П. Физика газового разряда / Ю. П. Райзер. – М.: Наука, 1987. – 592 с.
5. Карпенко Е. И. Введение в плазменно-энергетические технологии использования твердых топлив / Е. И. Карпенко, В. Е. Мессерле. – Новосибирск: Наука, 1997. – 119 с.
6. Кукота Ю. П. Плазменный поджиг высокосольных антрацитов при их факельном сжигании / Ю. П. Кукота, Д. Л. Бондзик, Н. И. Дунаевская и др. // Пром. теплоэнергетика. – 2004. – № 6. – С. 146 – 151.
7. Хзмалян Д. М. Теория горения и топочные устройства / Д. М. Хзмалян, Я. А. Каган. – М.: Энергия, 1976. – 485 с.
8. Ваврив Д. М. О механизме взаимодействия СВЧ-разряда с пылеугольным потоком / Д. М. Ваврив, А. В. Тымчик, А. И. Ивановский и др. // Пробл. машиностроения. – 2006. – Т. 9, № 1. – С. 85 – 90.

Поступила в редакцию
25.02.10