

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 1286770 (СССР). Способ образования трещин в плоскости, перпендикулярной продольной оси скважины / В.С.Кулинич, В.И.Тейтель, В.Н.Задорожний и др. – Оpubл. в Б.И., 1987, № 4.
2. Кулинич В.С., Шевелев Г.А., Егоров С.И. Методы и средства определения параметров геомеханического состояния газоносного породного массива. – Донецк: ЦБНТИ, 1994. – 202 с.
3. Кулинич С.В. Оценка напряженного состояния газоносного породного массива // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины. – 2000. – Вып. 17. – С. 311-314.

УДК 662.612.322

И.Ф. Чемерис, И.Л. Слободяникова,  
ИГТМ НАН Украины

### МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫГОРАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В ПУЛЬСИРУЮЩЕМ КИПЯЩЕМ СЛОЕ

*Розглянуто методику розрахунку ефективності вигорання твердого палива при пульсуючій подачі повітря в киплячий шар у порівнянні з постійним розходом за допомогою безрозмірної функції вигорання горючих. Показана перевага спалювання твердого палива шляхом пульсуючої подачі повітря у киплячий шар.*

### THE METHODS OF DEFINING THE EFFECTIVENESS OF THE BURNING-OUT OF THE SOLID FUEL IN PULSING BOILING LAYER

*The methods of calculating the effectiveness of the burning-out of a solid fuel during the pulsing air supply into boiling layer are analyzed in comparison with constant consumption with the help of unlimited function of the burning-out of the fuel. The advantages of the solid fuel burning-out through the pulsing air supply into boiling layer are shown.*

Одним из наиболее перспективных путей сжигания твердого топлива в кипящем слое является пульсационная подача ожигающего агента (воздуха) в кипящий слой, что подтверждается выполненными ранее исследованиями [1,2,3].

Горение частиц топлива состоит в основном из двух процессов: химической реакции, которая происходит на поверхности или близко к поверхности частицы, и диффузии, с помощью которой газы достигают поверхности и отводятся продукты сгорания. Обычно рассматриваются следующие химические реакции [4]



Распределение концентраций кислорода  $C_{O_2}$ , оксида  $C_{CO}$  и диоксида  $C_{CO_2}$  углерода по высоте топки  $h$  определяется решением системы уравнений [4]

$$u_g \frac{dC_{O_2}}{dh} = -\alpha_1 \cdot S \cdot C_{O_2} \quad (3)$$

$$u_g \frac{dC_{CO_2}}{dh} = -\alpha_2 \cdot S \cdot C_{CO_2} + \alpha_1 \cdot S \cdot C_{O_2} \quad (4)$$

где  $u_g$  - скорость газа, м/с;  $\alpha_1, \alpha_2$  - суммарные коэффициенты расходования кислорода по реакции (1), углекислого газа по реакции (2) соответственно, м/с;  $S$  - удельная реакционная поверхность в единице объема слоя, 1/м.

Аналитическое решение системы уравнений (3) и (4) имеет следующий вид

$$C_{O_2} = C_0 \cdot \exp\left(-\frac{\alpha_1 \cdot S \cdot H}{u_g}\right) \quad (6)$$

$$C_{CO_2} = \frac{C_0}{1 - \frac{\alpha_2}{\alpha_1}} \left[ \exp\left(-\frac{\alpha_2 \cdot S \cdot H}{u_g}\right) - \exp\left(-\frac{\alpha_1 \cdot S \cdot H}{u_g}\right) \right], \quad (7)$$

где  $C_0$  - концентрация кислорода в дутье, 21 %;  $H$  - высота кипящего слоя, м.

Концентрация  $C_{CO}$  определяется из уравнения баланса [5]

$$C_{O_2} + C_{CO_2} + 0,605 \cdot C_{CO} = C_0. \quad (8)$$

Суммарный коэффициент расходования кислорода, рассчитанный по интерполяционным формулам [6], запишется в виде

$$\alpha_1 = \left( \frac{1}{k_1} + \frac{d_u}{Sh \cdot D} + \frac{S}{\beta} \cdot \xi^2 \right)^{-1}. \quad (9)$$

Аналогичное выражение можно записать и для реакции (2)

$$\alpha_2 = \left( \frac{1}{k_2} + \frac{d_u}{Sh \cdot D} + \frac{S}{\beta} \cdot \xi^2 \right)^{-1}, \quad (10)$$

где  $k_1, k_2$  - константы скорости химических реакций [7], м/с;  $d_u$  - диаметр угольной частицы, м;  $D$  - эффективный коэффициент диффузии [8], м<sup>2</sup>/с;  $Sh$  - критерий Шервуда;  $\beta$  - среднеинтегральный коэффициент массоотдачи, 1/с;  $\xi$  - доля кислорода, проходящего через слой в пузырьках.

При пульсационной подаче оживающего агента критерий Шервуда может быть рассчитан по формуле

$$Sh = 2(\varepsilon + 0,276\sqrt{Re_n}), \quad (11)$$

где  $Re_n = u_n \cdot d_u / \nu_g$  - пульсационный критерий Рейнольдса;  $u_n$  - пульсационная скорость газа, м/с;  $\nu_g = \mu_g / \rho_g$  - кинематическая вязкость газа, м<sup>2</sup>/с;  $\mu_g$  - вязкость газа, Па·с;  $\rho_g$  - плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon$  - порозность слоя, определяемая по формуле [9]

$$\varepsilon = 1,2 \cdot \varepsilon_0 \left( \frac{u_n}{u_{mf}} \right)^{0,08 + 4 \cdot 10^{-8} Ar}, \quad (12)$$

где  $\varepsilon_0 = 0,4$  - порозность слоя на пороге начала псевдооживления;  $u_{mf}$  - минимальная скорость псевдооживления (м/с), рассчитанная по выражению

$$u_{mf} = \frac{\nu_g}{d_i} \cdot \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}}, \quad (13)$$

где  $d_i$  - диаметр инерта, м;  $Ar = (g \cdot d_i^3 / \nu_g^2) \cdot [(\rho_i - \rho_g) / \rho_g]$  - критерий Архимеда;  $\rho_i, \rho_g$  - плотность инерта и газа соответственно, кг/м<sup>3</sup>.

Удельная реакционная поверхность может быть вычислена по среднему размеру частицы в диапазоне от максимального в рассеве до значения, определяемого скоростью витания

$$S = \frac{6 \cdot \rho_{cp} \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot \eta \cdot z}{d_u \cdot \rho_u}, \quad (14)$$

где  $z$  - относительная массовая концентрация горючих в слое;  $\rho_u$  - плотность угольной частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{cp} = \rho_i(1 - z) + \rho_u \cdot z$  - средняя плотность частиц кипящего слоя, кг/м<sup>3</sup>;  $\eta = H/H_0$  - степень расширения слоя, где  $H_0$  - высота кипящего слоя в начале псевдооживления, м.

Среднеинтегральное значение коэффициента массоотдачи  $\beta$ , может быть получено путем интегрирования по высоте и представлено в виде

$$\beta = \frac{1}{H} \int_{H_0}^H \frac{6 \cdot [0,75 \cdot u_{mf} + 0,975 \cdot D^{0,5} \cdot (g/d_n)^{0,25}] \cdot (u_n - u_{mf})}{d_n \cdot (u_n - u_{mf} + 0,71\sqrt{gd_n})} dH \quad (15)$$

где  $d_n$  - диаметр пузыря (м), определяемый по формуле

$$d_n = 0,53 \cdot (u_n - u_{mf})^{0,4} \cdot H^{0,7}. \quad (16)$$

Доля газа, проходящего через слой в пузырях рассчитывается по формуле

$$\xi = \begin{cases} 1 - \frac{u_{mf}}{u_n}, & \text{при пузырьковом режиме псевдооживления} \\ 0, & \text{при ттурбуленном режиме и режиме "проточных" пузырей} \end{cases} \quad (17)$$

Скорость выгорания слоя и состав образующихся газообразных продуктов определяются прежде всего качеством топлива, размером частиц, температурой слоя, скоростью дутья и концентрацией горючих в слое. В качестве обобщающего безразмерного параметра горения углерода с единицы площади кипящего слоя может быть использована функция выгорания в виде [10]

$$\phi(z) = 0,5 \cdot \left( 1 - 3,76 \cdot \frac{C_{O_2} - 0,5 \cdot C_{CO}}{100 - C_{CO} - C_{CO_2} - C_{O_2}} \right). \quad (18)$$

Целью исследования являлось определение эффективности выгорания твердого топлива при пульсационной подаче ожигающего агента в кипящий слой по сравнению с постоянной подачей ожигающего агента в кипящий слой при равном расходе за период.

Для сравнения была использована методика расчета выгорания твердого топлива в кипящем слое, которая показала удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными [6].

Скорость газа  $u_g$  при пульсационной подаче ожигающего агента в формулах (6) и (7) задавалась в виде функции

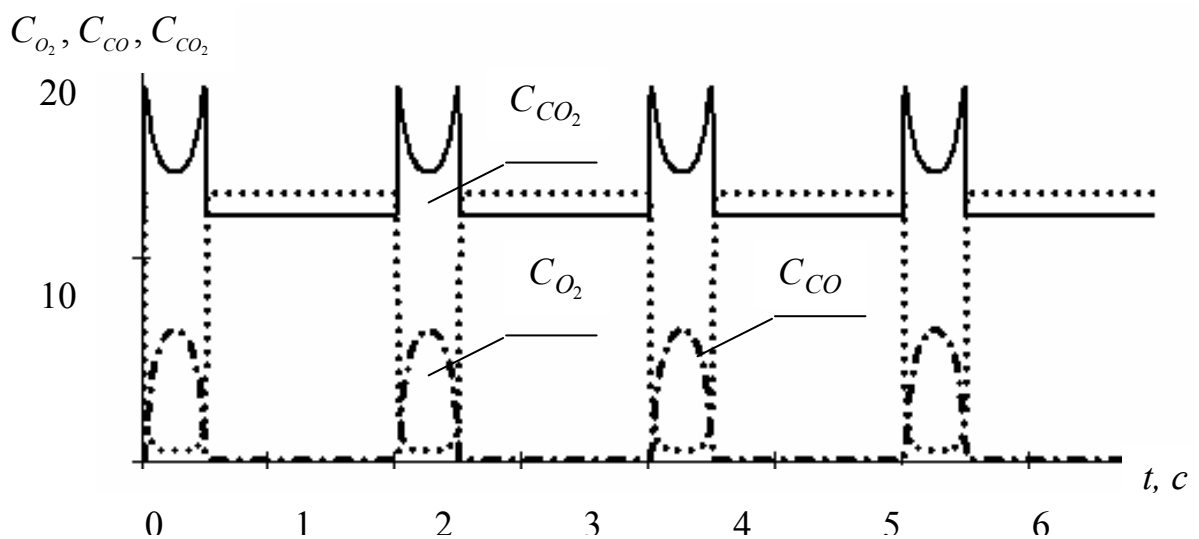
$$u_n(t) = \begin{cases} A \cdot \sin\left(\frac{10}{\psi\pi} t\right) + u_0, & \text{если } t < \psi \\ u_0, & \text{если } \psi < t < T \end{cases} \quad (19)$$

где  $A$  - амплитуда синусоиды, м/с;  $u_0$  - постоянная составляющая скорости оживающего агента, м/с;  $T$  - период пульсаций, с;  $\psi$  - скважность.

Исходные данные для расчета взяты аналогично приведенным в работе [6]. Средний диаметр угольных частиц принимался равным 2,5 мм, период пульсаций – 2 с, скважность – 0,25.

Результаты расчета газообразования в пульсирующем кипящем слое при сжигании твердого топлива представлены на рисунке 1.

Как видно из рисунка 1, введение пульсационной скорости оживающего агента влечет за собой изменение концентраций продуктов сгорания от времени. Поэтому для сравнения полученных результатов эффективности выгорания углерода при пульсирующей подаче оживающего агента с расчетными данными по методике, представленной в работе [6], формулы (6) и (7) были проинтегрированы по периоду, т.е. получены среднеинтегральные значения концентраций продуктов сгорания, не зависящие от времени.

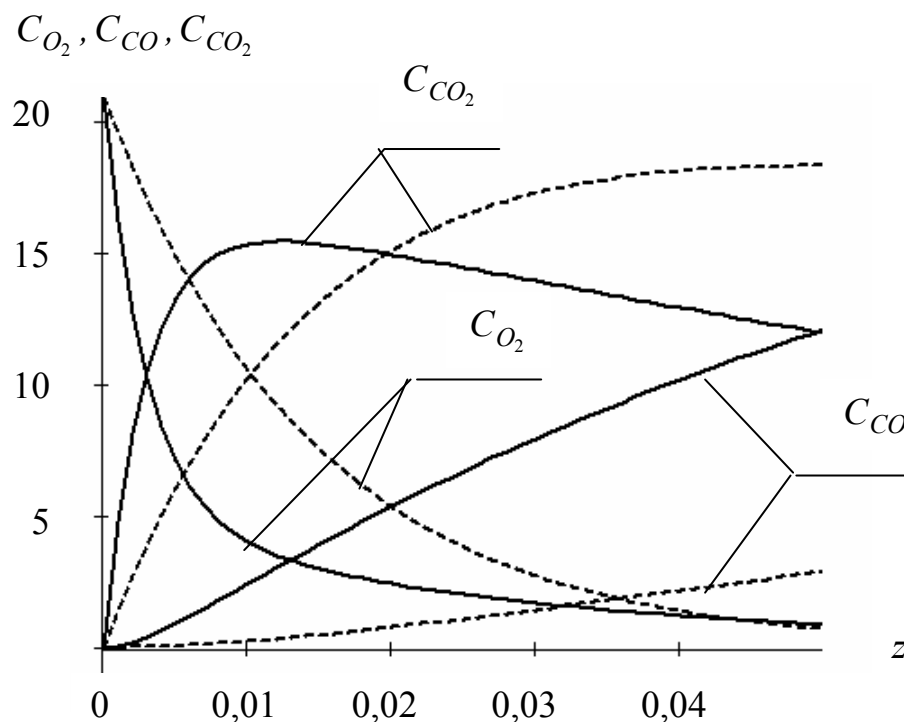


**Рис. 1. Изменение состава продуктов сгорания от времени при концентрации горючих в слое  $z = 0,04$**

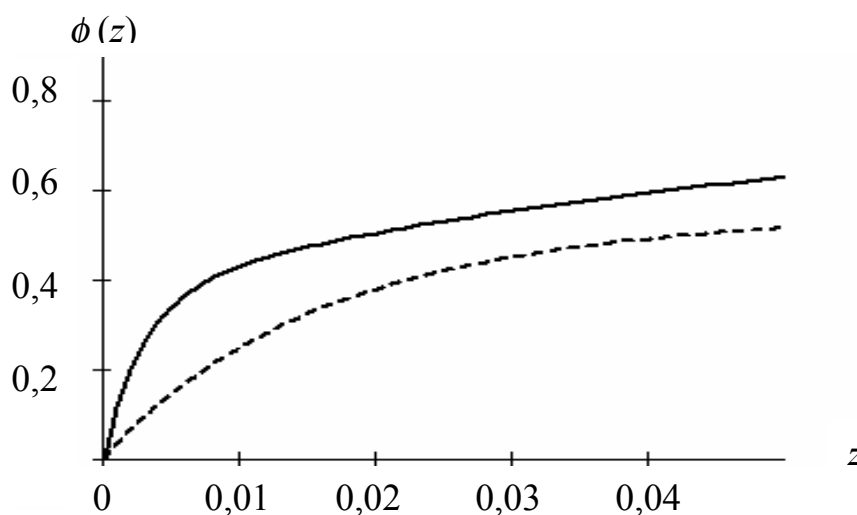
На рисунках 2 и 3 представлены результаты сравнения расчетов выгорания топлива: сплошной линией – при пульсирующей подаче оживающего агента; пунктирной – при постоянной подаче оживающего агента с использованием расчетных данных по методике [6].

Как видно из рисунка 2, пульсационная подача воздуха приводит к существенному возрастанию в газах оксида углерода, а также росту потре-

блнения кислорода воздуха, что приводит к увеличению скорости выгорания топлива в пульсирующем кипящем слое, т.е. увеличению безразмерной функции выгорания (рисунок 3).



**Рис.2. Изменение состава продуктов сгорания**



**Рис.3. Изменение безразмерной функции выгорания  $\phi(z)$**

Проведенные исследования показали повышение эффективности выгорания твердого топлива при пульсирующей подаче воздуха на 20 % – 50

% (при концентрации горючих в слое  $z = 0,04 \div 0,01$ ). Предложенная методика позволяет вести анализ эффективности выгорания топлива в слое при изменении различных параметров пульсаций скорости оживающего агента, таких как период и скважность. Кроме того, возможно исследовать влияние параметров кипящего слоя, таких как диаметры инерта и угольных частиц, температуры кипящего слоя и его высоты на эффективность выгорания топлива.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чемерис И.Ф., Головки Ю.Н. Влияние параметров пульсирующего потока газозвеси на горение угольной частицы в топке циркулирующего кипящего слоя / Геотехническая механика. Межведомств. сб. науч. трудов, вып.25.2001, с.43 – 47
2. Северянин В.С. Горение частицы топлива в пульсирующем потоке. Известия Вузов. Энергетика. 1975. № 6.с. 144-147.
3. Чемерис И.Ф., Головки Ю.Н. Слободяникова И.Л. Исследование математической модели процесса горения угольной частицы при переменных параметрах пульсирующего потока газозвеси./Геотехническая механика. Межведомств.сб.науч.трудов, вып.29.2001, с. 176 – 182
4. Хитрин Л.Н. Физика горения и взрыва. М., 1957. – С.442
5. Головина Е.С. Высоко-температурное горение и газификация углерода. М.:Энергоатомиздат, 1983. – С.176
6. Мунц В.А., Баскаков А.П, Ашихмин А.А. Расчет газообразования при горении твердого топлива в кипящем слое. ИФЖ. Т.54. № 3. 1988. – с. 432 – 438.
7. Виленский Т.В., Хзмалян Д.М. Динамика горения пылевидного топлива. М.:Энергия. 1977 – С.248
8. Бабий В.И., Серебрякова А.Г. Массообмен между частицами угольной пыли и газовой средой при горении. Теплоэнергетика. № 2. 1971 – с.40 – 44.
9. Анштейн В.Г. О расширении псевдооживленного слоя. Химия и химическая технология. 1997, том 40, вып.1.стр.129-131.
10. Волкова А.А., Шихов В.Н., Баскаков А.П. Моделирование и организация процессов сжигания твердого топлива в низкотемпературном кипящем слое./Проблемы тепло- и массопереноса в процессах горения, используемых в энергетике. Минск, 1980.- с. 79 – 94.