

И.Л. Дякун

ВЛИЯНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ГАЗОВОГО ПОТОКА НА СТАБИЛИЗАЦИЮ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ В КИПЯЩЕМ СЛОЕ

Аннотация. В статье рассмотрены модель и методика расчета рациональных параметров пульсирующего потока, а также движения и горения угольной частицы в кипящем слое. Предложена эмпирическая зависимость эффективности процесса газообразования при выгорании горючих, учитывающая режимные параметры пульсирующего кипящего слоя. Проведены исследования закономерностей влияния амплитудно-частотных характеристик пульсирующей подачи воздуха на полноту выгорания угольных частиц в слое. Разработаны конструкции технических средств (пульсаторов), реализующих подачу пульсирующего воздуха в кипящий слой и обеспечивающих регулирование формы колебаний, а также скважности воздушного потока.

Ключевые слова. Кипящий слой, период, скважность, горение, пульсатор.

Мировая тенденция для угольных, горнодобывающих, металлургических и коксохимических предприятий заключается в их объединении в рамках одной технологической цепочки, позволяющей оптимизировать использование ресурсов, снизить затраты и выпускать продукцию с более высокой добавочной стоимостью. Для большинства угольных предприятий таким решением является внедрение энерготехнологической переработки низкосортного угля в кипящем слое. Важным преимуществом этой технологии является возможность ее реализации путем реконструкции существующих на каждом предприятии типовых котельных агрегатов с минимальными капитальными затратами. Конечными продуктами данной технологии являются летучие компоненты угля, которые с точки зрения экологической и экономической эффективности целесообразно использовать для газификации или сжигания, и твердый остаток с высоким содержанием углерода – кокс или полукокс, который можно использовать как тех-

нологическое топливо с более высокой потребительской стоимостью, чем исходный уголь [1].

Достоинства кипящего слоя отмечены многими исследователями и разработчиками, однако наряду с ними этой технологии присущи и недостатки [2]. Так, вызванное интенсивным перемешиванием твердых частиц выравнивание температур и концентраций в слое приводит к уменьшению движущей силы процесса. Иногда проскок значительных количеств газа без достаточного контакта с твердым зернистым материалом уменьшает выход целевого продукта и осложняет осуществление каталитических процессов, кроме того при недостаточном динамическом напоре воздуха происходит зашлаковывание межсоплового пространства и самих сопел воздухораспределительных колосниковых решеток. Устранение этих недостатков возможно при подаче в слой пульсирующего потока оживающего агента (газа, воздуха). При этом, управляя скоростью, частотой и скважностью пульсирующих струй оживающего агента в реакционной зоне, можно получить различную структуру потоков, интенсифицировать тепломассобменные процессы и повысить производительность агрегатов [3].

Основной целью данной работы является исследование пульсирующих режимов в технологических процессах кипящего слоя для обеспечения выравнивания хода процесса во всем объеме слоя и интенсификации межфазных переходов и химических реакций.

Рассмотрим математическую модель горения угольной частицы при пульсирующей подаче оживающего агента (газа, воздуха). В данном случае используется так называемый «одночастичный» подход к описанию поведения угольной частицы в потоке. При этом траектория и скорость перемещения частицы получены на основе анализа сил, действующих на частицу переменной массы в пульсирующем потоке газозвеси. На основе литературного анализа подобраны формулы для основных параметров газозвеси – порозности, плотности и вязкости, позволяющие учитывать нестационарность несущей фазы (импульса), а также влияние величин, определяющих характеристики слоя, – диаметров инерта и угольной частицы, температуры, плотности и вязкости газа или воздуха. Совокупность этих формул впервые применена в рамках одной модели [4]

$$\frac{d\delta}{dt} = -\frac{4D(c-c_0)}{\beta v \rho_s d_0^2 \delta} \left[1 + 0,276 \sqrt{\frac{d_0}{v_g} |U - U_{II}|} \right]; \quad \frac{dU}{dt} = 2g \frac{\rho_s - \rho_q}{2\rho_q + \rho_s} + \frac{36\mu_s(U - U_{II})}{d_0^2 \delta^2 (2\rho_q + \rho_s)}; \quad (1)$$

где $\delta = d/d_0$ – относительный диаметр частицы; t – время; D – коэффициент диффузии; c_0, c – концентрация кислорода в потоке и на поверхности частицы соответственно; $\beta = 12/32$ – отношение молекулярных масс углерода и кислорода; ν – стехиометрический коэффициент при углероде в уравнении реакции, протекающей на поверхности частицы; ρ_s, ρ_v – плотность газозвеси и угольной частицы, соответственно; d_0 – начальный диаметр частицы; ν_g – кинематическая вязкость газа; U – скорость перемещения частицы; $U_{\text{п}}$ – пульсационная скорость газозвеси; μ_s – вязкость газозвеси.

Система уравнений (1) решается методом Рунге-Кутты с начальными условиями $\delta = 1, U = 0$ при $t = 0$. В качестве параметра, характеризующего влияние пульсаций на скорость горения частицы при переменных параметрах потока, определялась величина относительного уменьшения времени горения

$$\theta = \frac{\Delta t_g}{t_{g0}} = \frac{t_{g0} - t_g}{t_{g0}},$$

где t_g, t_{g0} – время сгорания частицы в слое при пульсирующем и стационарном режиме подачи воздуха, соответственно. Очевидно, что чем больше значение θ , тем более эффективными можно считать режимные параметры пульсирующего потока. На рис. 1 показано относительное уменьшение времени горения в зависимости от скважности.

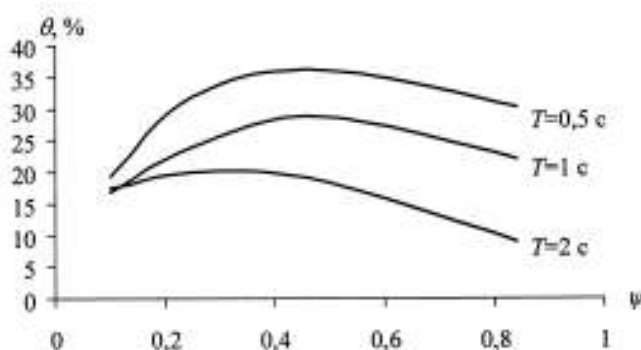


Рисунок 1 – Относительное уменьшение времени горения угольной частицы

Как видно из рис. 1, влияние изменения скважности пульсации на скорость горения угольной частицы можно описать как непрерывную функцию, имеющую максимум, смещающийся в сторону

меньших скважностей при увеличении периода пульсаций. Рациональными параметрами пульсаций являются период $T = 0,5 - 2$ с и скважность $\psi = 0,3 - 0,4$, что обеспечивает повышение скорости горения твердого топлива в пульсирующем кипящем слое по сравнению со стационарным на 20 – 40 %.

С использованием данной модели исследовано влияние формы пульсаций скорости воздуха на время нахождения угольной частицы в слое по сравнению с постоянным потоком газозвеси при равном расходе за период. В первом случае использовался пульсирующий поток с наложением поличастотной составляющей (рис. 2), а во втором случае подача воздуха в слой производилась импульсно-реверсивным способом (рис. 3) с импульсной подачей первичного воздушного потока в подрешеточную часть топки и вторичного потока – над слоем топлива.

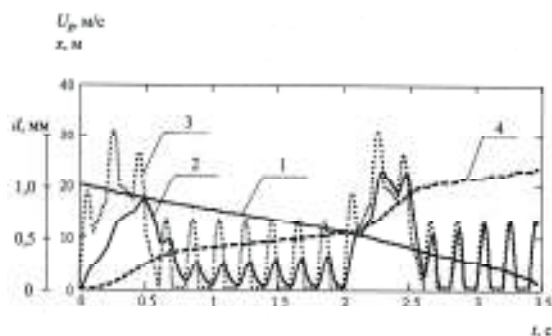


Рисунок 2 – Параметры процесса в поличастотном пульсирующем потоке:

1 – диаметр частицы; 2 – скорость частицы; 3 – скорость газа; 4 – путь частицы

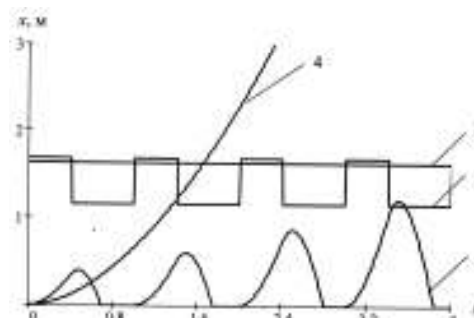


Рисунок 3 - Высота слоя и координата частицы в кипящем слое:

1, 2 – импульсно-реверсивная; 3, 4 – постоянная подача воздуха в слой

Исследования показали, что максимальная разница скоростей фаз газозвеси, состоящей из смеси инерта и угля, обеспечивающая полное выгорание частицы в слое при воздействии пульсирующих струй, достигается при скважности $\psi = 0,3 - 0,4$.

Расчет газообразования при горении твердого топлива в кипящем слое проводят по методике [5]. Особенность пульсирующего режима, а именно, зависимость от времени процесса требует расчета среднеинтегрального за период пульсации значения данных, что затрудняет анализ при проведении исследований по этой методике. Нами впервые была получена эмпирическая зависимость, позволяющая

провести качественный анализ эффективности выгорания топлива в слое при изменении различных параметров как слоя газозвеси, так и пульсирующего потока воздуха

$$\phi(z) = A[1 - \exp(-Bz)]; \quad (2)$$

$$A = 0,64 \left(\frac{H_0}{d_i} \right)^{0.1} \left(\frac{k_1}{k_2} \right)^{-0.09} Pe^{-0.15} \psi^{-0.05};$$

$$B = 966,85 \left(\frac{H_0}{d_i} \right)^{0.1} \left(\frac{k_1}{k_2} \right)^{-0.1} Pe^{-0.65} \psi^{-0.15}.$$

где z – относительная массовая концентрация горючих компонентов в слое; H_0 – начальная высота слоя; d_i – диаметр частиц инерта; k_1 , k_2 – константы скорости реакций; Pe – критерий Пекле; ψ – скважность потока.

При пульсирующей подаче воздуха зависимость функции выгорания (2) твердого топлива в газозвеси от относительной массовой концентрации горючих компонентов z в слое описывается сложной линейной функцией относительно экспоненты с отрицательным аргументом, коэффициенты которой обратно пропорциональны критерию Пекле, скважности пульсаций, а также отношению величин констант скоростей химических реакций и соотношению таких параметров газозвеси, как начальная высота слоя и диаметр частиц инерта.

На рис. 4, 5 представлены результаты сравнения расчетных данных для стационарного и пульсирующего потоков.

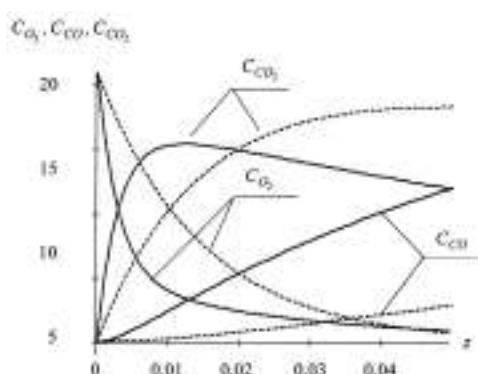


Рисунок 4 – Изменение состава продуктов сгорания

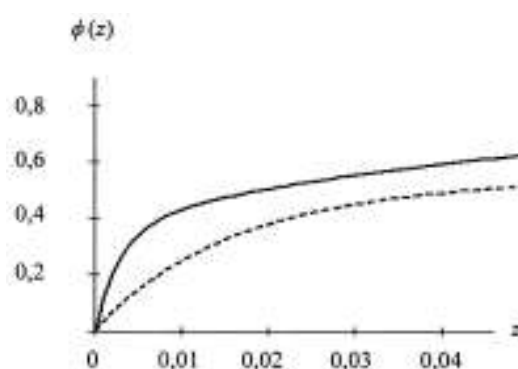


Рисунок 5 – Изменение функции выгорания $\phi(z)$

Как видно из рис. 4, пульсационная подача воздуха приводит к существенному возрастанию содержания в газах оксидов углерода, а также росту потребления кислорода воздуха, что приводит к увели-

чению скорости выгорания топлива, т.е. к увеличению безразмерной функции выгорания (рис. 5). Исследования показали повышение эффективности процессов газообразования в слое на 20 % – 50 % при применении пульсирующей подачи воздуха при концентрации горючих в слое $z = 0,04 \div 0,01$.

Подача пульсирующего воздуха осуществляется с помощью пульсатора. Анализ технических средств подачи пульсирующего потока воздуха показал, что известные конструкции не позволяют регулировать скважность импульсов подаваемого воздуха и отличаются конструктивной и технологической сложностью, а также высоким аэродинамическим сопротивлением [6]. Специалистами ИГТМ НАН Украины были разработаны конструкции пульсаторов следующих типов: пульсатор с трехлопастной крыльчаткой [7], пульсатор со щелевым ротором [8], дисковый пульсатор [9], позволяющие регулировать скважность потока и форму пульсаций.

Выводы. Впервые предложены научные основы расчета параметров процессов в кипящем слое при пульсирующей подаче воздуха в слой. Для реализации теоретических предпосылок разработаны различные конструкции пульсаторов. Исследования показали, что при рациональном управлении параметрами организованной пульсации несущей фазы достигается более равномерное протекание процессов по сечению и высоте кипящего слоя, повышается эффективность теплопередачи как в результате влияния на кинетику реакций угольных частиц, так и благодаря улучшению аэродинамики слоя, ликвидации застойных зон и локализованного движения газов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корчевой Ю.П. Экологически чистые угольные энерготехнологии / Ю.П. Корчевой, А.Ю. Майстренко, А.И. Топал. – К : Наукова думка, 2004. – 186 с.
2. Баскаков А.П. Котлы и топки с кипящим слоем / А.П. Баскаков, В.В. Мацнев, И.В. Распопов. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 352 с.
3. Рассудов Н.С. О применении импульсной подачи воздуха в топках с кипящим слоем / Н.С. Рассудов, А.Е. Варламова // Теплоэнергетика. – 1983. – № 1. – С.27-30.

4. Булат А.Ф. Научно-технические основы создания шахтных когенерационных энергетических комплексов / А.Ф. Булат, И.Ф. Чемерис – К.: Наукова думка, 2006. – 175 с.
5. Мунц В.А. Расчет газообразования при горении твердого топлива в кипящем слое / В.А. Мунц, А.П. Баскаков, А.А. Ашихмин // ИФЖ. – 1988. – т. 54, № 3. – С. 432 – 438.
6. А.с. 1597637 СССР, 5 G 01 L 27/00. Устройство для колебаний газового потока /Б.М. Галицейский, Н.Н. Иноземцев, А.Л.Ложкин, А.А. Ноздрин.- № 4465543/24-10; Заявл. 26.07.88; Опубл. 07.10.90, Бюл. № 37//Открытия. Изобретения.– 1990. – № 37
7. Пат. 66646А Україна, (51) МПК 7 G01L27/00, F15B21/12. Пристрій для створення пульсуючих повітряних потоків у топці з киплячим шаром / Чемерис І.Ф., Булат А.Ф., Возиянов В.С., Слободяникова І.Л. (Дякун І.Л.); заявник та патентовласник ІГТМ НАНУ. – № 2003087753; заявл. 15.08.2003; опубл. 17.05.2004, Бюл. № 5.
8. Пат. 4855 Україна, (51) МПК 7 G01L27/00, F15B21/12. Пристрій для створення пульсуючих повітряних потоків у топці з киплячим шаром / Чемерис І.Ф., Булат А.Ф., Возиянов В.С., Слободяникова І.Л. (Дякун І.Л.); заявник та патентовласник ІГТМ НАНУ. – № 20040503291; заявл. 05.05.2004; опубл. 15.02.2005, Бюл. № 2.
9. Пат. 7783 Україна, (51) МПК 7 G01L27/00, F15B21/12. Пристрій для створення пульсуючих повітряних потоків у топці з киплячим шаром / Чемерис І.Ф., Булат А.Ф., Возиянов В.С., Слободяникова І.Л. (Дякун І.Л.); заявник та патентовласник ІГТМ НАНУ. – № 20041108903; заявл. 01.11.2004; опубл. 15.07.2005, Бюл. № 7.