

3. Hartge E.U., Rensner D., Werther J. Solids concentration and velocity patterns in circulating fluidized beds // Circulating Fluidized Bed Technology. II. Proc. 2nd Int. Conf. — Oxford : Pergamon, 1988.
4. Bolton L.W., Davidson J.F. Recirculation of particles in fast fluidized risers // Ibid. — P. 39–42.
5. Hoggen B., Lindstad T., Engh T.A. Distribution of particles in the freeboard region above a fluidized bed // Fluidization. — New York : Eng. Found. Publ., 1986. — P. 297–304.
6. Краснощекоев Е.А., Сукомел А.М. Задачник по теплотопередаче. — М. : Энергия, 1980. — 288 с.
7. Баскаков А.П., Лукачевский Б.П., Мухленов И.П. и др. Расчеты аппаратов кипящего слоя : Справ. — Л. : Химия, 1986. — 352 с.
8. Померанцев В.В., Арефьев К.И., Ахмедов Д.Б. и др. Основы практической теории горения. — Л. : Энергоатомиздат, 1986. — 312 с.
9. Майстренко О.Ю. Основні закономірності горіння та газифікації високозольного вугілля в різних модифікаціях киплячого шару : Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Київ, 1999. — 35 с.
10. Топал О.І. Кінетика та динаміка вигорання високозольного енергетичного вугілля у киплячому шарі під тиском : Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Київ, 2000. — 19 с.
11. Махорин К.Е., Хинкис П.А. Сжигание топлива в псевдооживленном слое. — Киев : Наук. думка, 1989.
12. Бородуля В.А., ГанжаВ.Л., Каменский В.И. Гидродинамика и теплообмен в псевдооживленном слое под давлением. — Минск : Наука и техника, 1982.
13. Рохман Б. Б. К моделированию процессов переноса в надслоевом пространстве топки парогенератора с циркулирующим кипящим слоем // Инж.-физ. журн. — 2006. — Т. 79, № 1. — С. 20–28.

Поступила в редакцию 23.06.10

The Engineering Calculation Method and Results of Circulating Fluidized Bed Boiler Calculation Research

Maystrenko A.Yu.¹, Rohman B.B.¹, Topal A.I.¹, Vyfatniuk V.G.², Chernyavskiy N.V.¹

¹ Coal Energy Technology Institute of NASU, Kiev

² Special Project Design Technological Bureau «Energomashproekt», Kiev

The method of engineering calculation of circulating fluidized bed (CFB) boiler by fluidized bed (FB) and freebed space (FBS) height is developed. The calculated pressure drops and temperatures in FB and FBS values proximity to the values specified for Lurgi-type CFB-boilers is displayed. Heat and mass transfer processes in freebed determinative role for combustion process as a whole is determined. It is established that circulating material coursing decreases FBS walls heat perception and decreases cyclone slagging. The methods of the factors influence reduction are proposed.

Key words: circulating fluidized bed, freebed, particle, combustion, heat perception.

Received June 23, 2010

УДК 676.2.024.74.044:547.458.61

Математическое моделирование процесса сгорания древесной частицы

Карп И.Н., Колесник В.В., Орлик В.Н., Пьяных К.Е., Юдин А.С.

Институт газа НАНУ, Киев

Обоснована физическая модель сгорания древесной частицы. Построена математическая модель процесса сгорания неподвижной частицы в кислородсодержащем потоке. Проведено детальное численное исследование стадий разогрева, удаления влаги, выделения и сгорания летучих компонентов, горения углеродного остатка частицы. Определены температурные уровни и длительность указанных стадий.

Ключевые слова: влага, испарение, летучие, горение, коксовый остаток, время выгорания.

Обґрунтовано фізичну модель деревної частки. Побудовано математичну модель процесу згоряння в нерухомих частинках у змішаному потоці, що містить кисень. Проведено детальне числове дослідження стадій розігріву, видалення вологи, виділення й згоряння легких компонентів, горіння вуглецевого залишку частки. Визначено температурні рівні й тривалість зазначених стадій.

Ключові слова: волога, випаровування, леткі, горіння, коксовий залишок, час вигорання.

Повышение стоимости природного газа инициирует использование запасов возобновляемых нетрадиционных источников энергии, одним из которых являются древесные отходы.

Использование древесины как энергоносителя в современных топливоиспользующих агрегатах требует проведения предварительных исследований для определения основных характеристик этого вида топлива. В частности, необходимы достоверные сведения о времени сгорания древесных частиц различного происхождения и различной структуры, изменяющейся в широких пределах, в зависимости от способа получения этих частиц. Стадийность процесса сжигания и время полного сгорания частиц являются определяющими при выборе конкретной технологии сжигания и ее конструктивном оформлении для древесных отходов различной природы.

В качестве первоочередной в работе рассматривается внутренняя задача процесса сжигания частицы, связанная с исследованием основных стадий: разогрева, удаления влаги (сушки), выделения и сгорания летучих компонентов, горения углеродного остатка частицы. Температура и состав газового потока, с которым контактирует частица, температура источника дополнительного радиационного обогрева (при его наличии) являются постоянными. Эти условия соответствуют процессу сжигания неподвижной частицы (тонкого слоя частиц) в проточном реакторе, когда параметры набегающего потока остаются неизменными, а измененные параметры уходящего потока не влияют на процесс сжигания частицы. Условия радиационного теплообмена с дополнительным высокотемпературным источником (например, с факелом от сгорания природного газа) также остаются неизменными в силу постоянства расстояния между этими объектами.

Подобная ситуация имеет место при лабораторных исследованиях, когда закрепленную частицу обдувают высокотемпературным газовым потоком с фиксированным содержанием кислорода (например, продуктами сжигания природного газа при коэффициенте избытка воздуха больше единицы), а о процессе сгорания частицы судят по изменению параметров уходящего потока.

Успешное решение внутренней задачи открывает перспективы исследования сжигания

древесных частиц путем математического моделирования, давая возможность учитывать взаимное влияние процессов в частице и окружающем газовом потоке. Способ и характер такого моделирования определяются выбранной технологией сжигания: неподвижный или псевдооживленный слой, проточный реактор со спутным движением газовой и твердой фазы, а также способом подвода или отвода тепла и т.п.

В топливоспользующих агрегатах, особенно при факельном сжигании, время выгорания частицы твердого топлива ограничивается, поэтому в работе рассматривается сжигание древесной частицы сферической формы диаметром до 3 мм.

Физическая модель исходной частицы.

Структура частицы исходного радиуса R_0 включает в себя твердую фазу и свободный объем пор, частично заполненный свободной водой.

Исходный объем пор определяется начальной порозностью ε_0 и равняется

$$V_{f0} = 4 \pi R_0^3 / (3 \varepsilon_0).$$

Заполненность пор свободной водой определяется коэффициентом ε_{wf} .

В состав твердой фазы входят минеральная часть, твердая горючая часть, состоящая из углерода и летучих, и связанная вода с соответствующими массовыми долями: x_z — доля минеральных компонентов плотностью ρ_z , удельной теплоемкостью c_z , теплопроводностью λ_z ; x_c — доля коксового остатка плотностью ρ_c , удельной теплоемкостью c_c , теплопроводностью λ_c ; x_l — доля летучих плотностью ρ_l , удельной теплоемкостью c_{ls} , теплопроводностью λ_l ; x_{wb} — доля связанной воды плотностью ρ_{wb} , удельной теплоемкостью c_{wb} , теплопроводностью λ_{wb} .

В первом приближении суммарная плотность ρ_s , теплоемкость c_s и теплопроводность λ_s твердой фазы равняются

$$\rho_s = 1 / (x_z / \rho_z + x_c / \rho_c + x_l / \rho_l + x_{wb} / \rho_{wb});$$

$$c_s = x_z c_z + x_c c_c + x_l c_{ls} + x_{wb} c_{wb};$$

$$\lambda_s = (x_z \lambda_z / \rho_z + x_c \lambda_c / \rho_c + x_l \lambda_l / \rho_l + x_{wb} \lambda_{wb} / \rho_{wb}) / (x_z / \rho_z + x_c / \rho_c + x_l / \rho_l + x_{wb} / \rho_{wb}) = (x_z \lambda_z / \rho_z + x_c \lambda_c / \rho_c + x_l \lambda_l / \rho_l + x_{wb} \lambda_{wb} / \rho_{wb}) \rho_s.$$

Общая влажность частицы W определяется отношением массы свободной и связанной воды ко всей массе частицы. При заданных W и x_{wb} степень заполнения пор свободной водой ε_{wf} определяется из выражения

$$\varepsilon_{wf} = [(1 - \varepsilon_0) \rho_s (W - x_{wb}) + W \varepsilon_0 \rho_{air}] / [\varepsilon_0 \rho_{wf} - W \cdot (\rho_{wf} - \rho_{air})],$$

где ρ_{air} — плотность воздуха.

Считается известным начальный радиус пор r_{p0} , размер которых зависит от материала и структуры строения частицы. Зависимость числа пор от радиуса r ($0 \leq r \leq R_0$) определяется соотношением

$$N_p(r) = 4 \varepsilon_0 (r/r_{p0})^2 = N_p(R_0) (r/R_0)^2,$$

где $N_p(R_0)$ — общее число пор на поверхности частицы, которое при дальнейших изменениях твердой фазы остается неизменным, $N_p(R_0) = N_{por}$.

Исходная удельная поверхность твердой фазы определяется соотношением

$$S_{s0} = 2 \varepsilon_0 / r_{p0}.$$

По мере удаления из твердой фазы связанной воды, летучих и коксового остатка будет меняться порозность и соответственно удельная поверхность отдельных участков частички. Так, на участке частицы, где удалена связанная вода (участок 2), порозность, радиус пор и удельная поверхность будут равны:

$$\varepsilon_2 = 1 - (1 - \varepsilon_0) (x_z/\rho_z + x_c/\rho_c + x_l/\rho_l) / (x_z/\rho_z + x_c/\rho_c + x_l/\rho_l + x_{wb}/\rho_{wb});$$

$$r_{p2} = 2 R_0 (\varepsilon_2/N_{por})^{0,5};$$

$$S_{s2} = 2 \varepsilon_2 / r_{p2}.$$

Аналогично, после удаления из твердой фазы остальных составляющих имеем на соответствующих участках частицы:

— после удаления летучих (участок 3):

$$\varepsilon_3 = 1 - (1 - \varepsilon_0) (x_z/\rho_z + x_c/\rho_c) / (x_z/\rho_z + x_c/\rho_c + x_l/\rho_l + x_{wb}/\rho_{wb});$$

$$r_{p3} = 2 R_0 (\varepsilon_3/N_{por})^{0,5};$$

$$S_{s3} = 2 \varepsilon_3 / r_{p3};$$

— после удаления коксового остатка (участок 4):

$$\varepsilon_4 = 1 - (1 - \varepsilon_0) (x_z/\rho_z) / (x_z/\rho_z + x_c/\rho_c + x_l/\rho_l + x_{wb}/\rho_{wb});$$

$$r_{p4} = 2 R_0 (\varepsilon_4/N_{por})^{0,5};$$

$$S_{s4} = 2 \varepsilon_4 / r_{p4}.$$

Начальный прогрев частицы и испарение свободной воды (этап 1)

На этапе первоначального прогрева теплотехнические свойства частицы определяются из выражений

$$\rho = (1 - \varepsilon_0) \rho_s + \varepsilon_0 [\varepsilon_{wf} \rho_{wf} + (1 - \varepsilon_{wf}) \rho_{air}];$$

$$c = \{(1 - \varepsilon_0) \rho_s c_s + \varepsilon_0 \times [\varepsilon_{wf} \rho_{wf} c_{wf} + (1 - \varepsilon_{wf}) \rho_{air} c_{air}]\} / \rho;$$

$$\lambda = (1 - \varepsilon_0) \lambda_s + \varepsilon_0 [\varepsilon_{wf} \lambda_{wf} + (1 - \varepsilon_{wf}) \lambda_{air}].$$

Первоначальный прогрев частицы описывается уравнением

$$\partial\theta/\partial t = a \partial^2\theta/\partial r^2 + 2 (a/r) (\partial\theta/\partial r), \quad 0 \leq r \leq R, \quad (1)$$

с граничными условиями

$$\partial\theta/\partial r|_{r=0} = 0,$$

$$\lambda \partial\theta/\partial r|_{r=R} = \alpha_{con} [t_{gas} - \theta(R)] + \alpha_{rad} [t_{fac} - \theta(R)], \quad (2)$$

где α_{con} — коэффициент конвективной теплоотдачи; t_{gas} — температура окружающего газа; α_{rad} — приведенный коэффициент радиационной теплоотдачи; t_{fac} — температура факела; $a = \lambda/(\rho c)$ в выражениях (1), (2).

Приведенный коэффициент радиационной теплоотдачи определяется из выражения

$$\alpha_{rad} = \varepsilon_{rad} \sigma \cdot 10^{-8} [(t_{fac} + 273,15)^3 + (t_{fac} + 273,15)^2 (\theta(R) + 273,15) + (t_{fac} + 273,15) (\theta(R) + 273,15)^2 + (\theta(R) + 273,15)^3],$$

где ε_{rad} — приведенный коэффициент черноты частицы; σ — постоянная Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ кВт/(м²·Т⁴).

Решение уравнения (1) с граничными условиями (2) на интервале $[0, R_0]$ осуществляется методом разностей по неявной схеме с шагом по времени Δt и радиусу $\Delta r = \text{const}$. Для решения соответствующей системы линейных алгебраических уравнений используется метод прогонки.

В момент времени τ_1 , когда температура поверхности $\theta(R)$ достигает температуры кипения свободной воды в порах t_{evwf} , образуется фронт испарения свободной воды радиуса R_1 , скорость движения которого определяется уравнением

$$dR_1/d\tau = -[(1 - \varepsilon) q_{in} - q_{out}] / (\varepsilon \varepsilon_{wf} \rho_{wf} \Delta H_{wf}),$$

где q_{in} — плотность приходящего извне теплового потока на границе испарения; q_{out} — плотность теплового потока, отходящего от границы

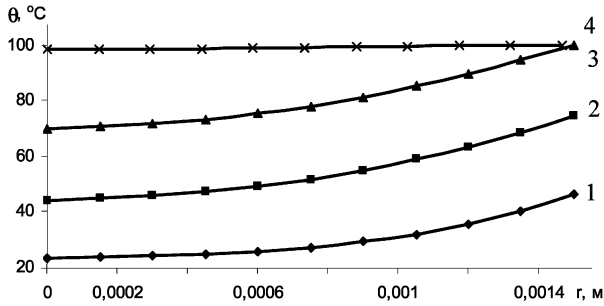


Рис.1. Изменение температуры частицы по радиусу на этапе прогрева до начала испарения свободной влаги, с: 1 — 0,04; 2 — 0,12; 3 — 0,20; 4 — 0,40. Исходный диаметр частицы 3 мм; начальная относительная влажность 13 %; исходная порозность частицы 0,8; температура окружающей среды 900 °С.

испарения внутрь частицы; ΔH_{wf} — удельная теплота испарения свободной воды:

$$q_{in} = \lambda_s d\theta / dr|_{r=R_1+0};$$

$$q_{out} = \lambda d\theta / dr|_{r=R_1-0}.$$

Предполагается, что подвод тепла осуществляется по скелету твердой фазы.

Расход испаренной влаги определяется из уравнения

$$G_{vap1} = 4 \pi R_1^2 [(1 - \epsilon) q_{in} - q_{out}] / \Delta H_{wf}.$$

Дальнейшее решение уравнения (1) на участке $[0, R_1]$, содержащем свободную влагу, осуществляется с переменным шагом Δr , при этом второе граничное условие (2) принимает вид

$$\theta(R_1) = t_{evwf}.$$

Решение продолжается до момента удаления всей свободной влаги из пор, которому соответствует выполнение условия $R_1 \approx 0$.

Результаты расчета процесса прогрева частицы до начала удаления свободной влаги приведены на рис.1.

Процесс прогрева твердой фазы и удаления связанной воды (этап 2)

Последующие процессы на участке твердой фазы, образовавшемся после удаления свободной воды из пор, связаны не только с дальнейшим прогревом, но и с последовательным удалением сначала связанной влаги, а затем летучих компонент. Ввиду отсутствия надежных данных о кинетике этих процессов предполагается, что каждый из них происходит при определенной температуре, которая остается постоянной до полного удаления соответствующего компонента. Само удаление связано с затратой определенного количества энергии.

После образования подвижного фронта испарения свободной влаги, на участке $[R_1, R_0]$ происходит нагрев твердой фазы с одновременным нагревом парового потока, образовавшегося в результате испарения свободной влаги, который движется по порам в направлении от R_1 к R_0 .

Уравнения, которые описывают нагрев твердой фазы и пара имеют вид

$$\partial\theta / \partial\tau = a \partial^2\theta / \partial r^2 + 2(a/r)(\partial\theta / \partial r) + S_s \alpha_T (t_{vap} - \theta) / [1 - \epsilon] (\rho_{s2} \rho_{s2}), R_1 \leq r \leq R_0; \quad (3)$$

$$dt_{vap} / dr = 4 \pi r^2 S_s \alpha_T (\theta - t_{vap}) / (G_{vap1} c_{vap}). \quad (4)$$

Граничные условия для температуры твердой фазы θ имеют вид

$$\theta(R_1) = t_{evwf};$$

$$\lambda_{s2} \partial\theta / \partial r|_{r=R_0} = \alpha_{con} [t_{gas} - \theta(R_0)] + \alpha_{rad} [t_{fac} - \theta(R_0)]. \quad (5)$$

Для температуры испаренной влаги t_{vap} имеем следующее условие при $r = R_1$:

$$t_{vap}(R_1) = t_{evwf}. \quad (6)$$

Здесь $a = \lambda_{s2} / (\rho_{s2} c_{s2})$, $\lambda_{s2} = \lambda_s$, $\rho_{s2} = \rho_s$, $c_{s2} = c_s$; S_s — удельная поверхность; c_{vap} — удельная теплоемкость водяного пара.

Решение уравнений (3), (4) с условиями (5), (6) на интервале $[R_1, R_0]$ осуществляется методом разностей по неявной схеме с шагом по времени $\Delta\tau$ и переменным шагом по радиусу Δr , для чего используется метод матричной прогонки.

В момент времени τ_2 , когда температура поверхности $\theta(R_0)$ достигает температуры выделения связанной воды, образуется фронт выделения связанной воды радиуса R_2 , скорость движения которого определяется уравнением

$$dR_2 / d\tau = -(q_{in} - q_{out}) / (\rho_{s2} x_{wb} \Delta H_{wb}),$$

где ΔH_{wb} — удельная теплота выделения связанной воды; q_{in} — плотность приходящего извне теплового потока на границе R_2 ; q_{out} — плотность теплового потока, отходящего от границы R_2 внутрь частицы:

$$q_{in} = \lambda_{s3} d\theta / dr|_{r=R_2+0};$$

$$q_{out} = \lambda_{s2} d\theta / dr|_{r=R_2-0},$$

где λ_{s3} — теплопроводность твердой фазы после удаления связанной воды.

Расход испаренной влаги определяется из уравнения

$$G_{vap2} = 4 \pi R_2^2 [(1 - \epsilon_2) q_{in} - (1 - \epsilon) q_{out}] / \Delta H_{wb}.$$

Дальнейшее решение уравнений (3), (4) осуществляется на участке удаления связанной влаги $[R_1, R_2]$, при этом второе граничное условие (5) принимает вид

$$\theta(R_2) = t_{evwb}.$$

Кроме того, в момент, когда завершается испарение всей свободной воды в порах ($R_1 \approx 0$), первое выражение в граничном условии (5) принимает вид

$$d\theta/dr|_{r=0} = 0.$$

Во всех указанных расчетах, кроме распределения температуры твердой фазы, вычисляется температура парового потока на выходе из текущего участка расчета t_{vap2} .

Расчет на данном участке продолжается до выполнения условия $R_2 \approx 0$, которое соответствует моменту удаления всей связанной влаги.

Процесс прогрева твердой фазы и удаление летучих (этап 3)

После удаления связанной влаги теплофизические параметры твердой фазы определяются из соотношений

$$\rho_{s3} = (1 - x_{wb}) / (x_z / \rho_z + x_c / \rho_c + x_l / \rho_l);$$

$$c_{s3} = (x_z c_z + x_c c_c + x_l c_l) / (1 - x_{wb});$$

$$\lambda_{s3} = (x_z \lambda_z + x_c \lambda_c + x_l \lambda_l) / (1 - x_{wb}).$$

Уравнения, описывающие нагрев твердой фазы и пара, имеют вид, аналогичный процессу нагрева и удаления связанной воды:

$$\partial\theta/\partial\tau = a \partial^2\theta/\partial r^2 + 2 (a/r) (\partial\theta/\partial r) + S_s \alpha_T (t_{vap} - \theta) / [1 - \varepsilon] (\rho_{s3} c_{s3}), R_2 \leq r \leq R_0; \quad (7)$$

$$dt_{vap}/dr = 4 \pi r^2 S_s \alpha_T (\theta - t_{vap}) / (G_{vap1} c_{vap}). \quad (8)$$

Граничные условия для температуры твердой фазы θ имеют вид

$$\theta(R_2) = t_{evwb};$$

$$\lambda_{s3} \partial\theta/\partial r|_{r=R_0} = \alpha_{con} [t_{gas} - \theta(R_0)] + \alpha_{rad} [t_{fac} - \theta(R_0)]. \quad (9)$$

Для пара t_{vap} имеем следующее условие при $r = R_2$:

$$t_{vap}(R_2) = (G_{vap1} t_{vap2} + G_{vap2} t_{evwb}) / (G_{vap1} + G_{vap2}) = (G_{vap1} t_{vap2} + G_{vap2} t_{evwb}) / G_{vap3}; \quad (10)$$

$$G_{vap3} = G_{vap1} + G_{vap2}.$$

Здесь $a = \lambda_{s3} / (\rho_{s3} c_{s3})$.

Решение уравнений (7), (8) с условиями (9), (10) на интервале $[R_2, R_0]$ осуществляется так же, как и при удалении связанной воды.

В момент τ_3 , когда температура поверхности $\theta(R_0)$ достигает температуры удаления летучих t_{evl} , образуется фронт радиуса R_3 , скорость движения которого определяется уравнением

$$dR_3/d\tau = -(q_{in} - q_{out}) / (\rho_{s3} x_l \Delta H_1),$$

где ΔH_1 — удельная теплота удаления летучих; q_{in} — плотность приходящего извне теплового потока на границе R_3 ; q_{out} — плотность теплового потока, отходящего от границы R_3 внутрь частицы: $q_{in} = \lambda_{s4} d\theta/dr|_{r=R_3+0}$; $q_{out} = \lambda_{s3} d\theta/dr|_{r=R_3-0}$ (здесь λ_{s4} — теплопроводность твердой фазы после удаления летучих).

Расход летучих определяется из уравнения

$$G_1 = 4 \pi R_3^2 [(1 - \varepsilon_3) q_{in} - (1 - \varepsilon_2) q_{out}] / \Delta H_1,$$

где ΔH_1 — теплота выделения летучих.

Дальнейшее решение уравнений (7), (8) осуществляется на участке удаления летучих $[R_2, R_3]$, при этом второе граничное условие (9) принимает вид

$$\theta(R_2) = t_{evl}.$$

В момент, когда завершается удаление всей связанной воды ($R_2 \approx 0$), первое условие в (9) принимает вид

$$\partial\theta/\partial r|_{r=0} = 0.$$

Во всех указанных расчетах, кроме распределения температуры твердой фазы, вычисляется температура парового потока G_{vap3} на выходе из текущего участка расчета t_{vap3} .

Расчет на данном участке продолжается до выполнения условия $R_3 \approx 0$, которое соответствует моменту удаления всех летучих.

На рис.2 представлены результаты расчетов процесса на этапах удаления свободной и

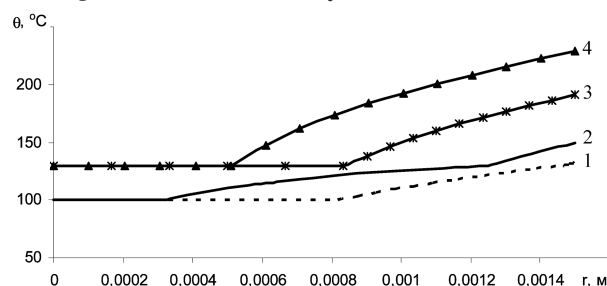


Рис 2. Изменение температуры частицы по радиусу на этапах удаления свободной и связанной воды, удаления летучих и прогрева углеродного остатка до момента горения летучих на поверхности частицы, с: 1 — 3; 2 — 5; 3 — 7; 4 — 7,96. Исходные параметры как на рис.1.

связанной влаги, удаления летучих и прогрева углеродного остатка до момента горения летучих на поверхности частицы.

Фаза факельного горения летучих и объемного нагрева твердой фазы (этап 4)

На момент начала выгорания коксового остатка рассматриваемая частица схематически представлена на рис.3.

До тех пор, пока существует смешанный конвективный поток газовой фазы, состоящий из водяного пара и летучих в газовой форме ($R_2 \neq 0$) или только из газовой формы летучих ($R_2 \approx 0, R_3 \neq 0$), проникновение внутрь пор кислорода из окружающей частицу газовой фазы невозможно.

На некотором расстоянии от внешней поверхности частицы образуется ореол из продуктов гомогенного окисления (горения) летучих, что никак не влияет на процесс теплообмена газовой фазы с частицей.

На этом участке твердая фаза контактирует с газовым потоком, состоящим из смеси водяного пара и летучих в газовой форме, концентрация которых равняется

$$x_{v1} = G_1 / (G_{vap3} + G_1).$$

Уравнения, описывающие нагрев твердой и смешанной газообразной фазы, имеют вид

$$\partial \theta / \partial \tau = a \partial^2 \theta / \partial r^2 + 2(a/r) (\partial \theta / \partial r) + S_s \alpha_T (t_{vp} - \theta) / [(1 - \varepsilon) (\rho_{s4} c_{s4})], R_2 \leq r \leq R_0; \quad (11)$$

$$dt_v / dr = 4 \pi r^2 S_s \alpha_T (\theta - t_v) / (G_{v4} c_{v4}). \quad (12)$$

Граничные условия для температуры твердой фазы θ имеют вид

$$\begin{aligned} \theta(R_3) &= t_{ev1}; \\ \lambda_{s4} \partial \theta / \partial r|_{r=R_0} &= \alpha_{con} [t_{gas} - \theta(R_0)] + \\ &+ \alpha_{rad} [t_{fac} - \theta(R_0)]. \end{aligned} \quad (13)$$

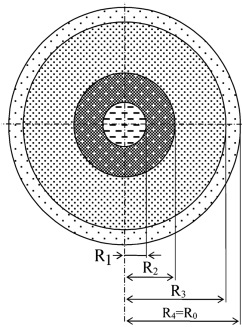


Рис.3. Схематическое изображение зон частицы от начала выгорания зольного остатка и до конца удаления свободной воды.

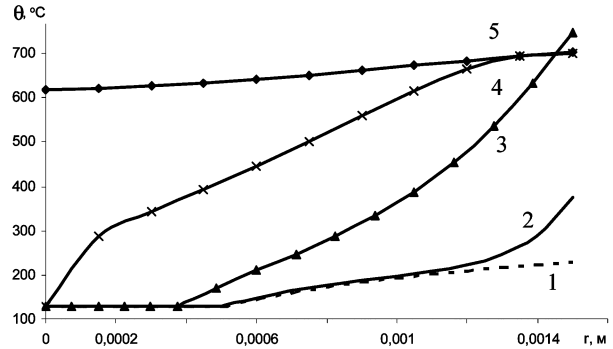


Рис. 4. Изменение температуры частицы по радиусу на этапах удаления летучих и их сгорания на поверхности частицы с одновременным прогревом углеродного остатка от времени, с: 1 — 7,96; 2 — 8; 3 — 8,2; 4 — 8,48; 5 — 9. Исходные параметры как на рис.1.

Для газообразной фазы t_v имеем следующее условие при $r = R_3$:

$$t_v(R_3) = (G_{vap3} c_{vap} t_{vap3} + G_1 c_1 t_{ev1}) / (G_{v4} c_{v4}), \quad (14)$$

где

$$G_{v4} = G_{vap3} + G_1;$$

$$c_{v4} = (1 - x_{v1}) c_{vap} + x_{v1} c_{v1};$$

c_{v1} — теплоемкость газообразной формы летучих.

Здесь

$$a = \lambda_{s4} / (\rho_{s4} c_{s4}).$$

Решение уравнений (11), (12) с условиями (13), (14) на интервале $[R_3, R_0]$ осуществляется так же, как и на предыдущих участках.

Данный процесс продолжается до тех пор, пока поверхность частицы не достигнет температуры воспламенения летучих t_1 . После этого сгорание летучих происходит непосредственно на поверхности частицы, что способствует ее дополнительному прогреву. Исходя из условий теплового баланса и брутто формулы сгорания летучих $C_5H_{10}O_4 + 5,5 O_2 = 5 CO_2 + 5 H_2O$, имеем для уравнения (11) вместо второго условия (13) следующее граничное условие ($r = R_0$):

$$\begin{aligned} \lambda_{s4} \partial \theta / \partial r|_{r=R_0} &= \alpha_{con} (t_{gas} - \theta(R_0)) + \\ &+ \alpha_{rad} (t_{fac} - \theta(R_0)) + G_1 (1,313 c_1 + H_1), \end{aligned} \quad (15)$$

где c_1 — удельная теплоемкость летучих в газовом состоянии; H_1 — удельная теплота сгорания летучих; 1,313 — коэффициент, отображающий увеличение объема продуктов сгорания по отношению к расходу летучих.

После полного удаления из твердой фазы летучих и их сгорания начинается фаза выгорания углеродного остатка.

На рис.4 представлены результаты расчета процесса на этапах удаления летучих и их сго-

рагия на поверхности частицы с одновременным прогревом углеродного остатка.

Фаза выгорания углеродного остатка (этап 5)

После удаления связанной воды и летучих твердая фаза состоит из минеральных компонентов и углеродного остатка. Ее теплофизические параметры определяются из соотношений

$$\begin{aligned} \rho_{s4} &= (1 - x_{wb} - x_l) / (1 / \rho_z + 1 / \rho_c); \\ c_{s4} &= (x_z \cdot c_z + x_c \cdot c_c) / (1 - x_{wb} - x_l); \\ \lambda_{s4} &= (x_z \cdot \lambda_z + x_c \cdot \lambda_c) / (1 - x_{wb} - x_l). \end{aligned}$$

Концентрация углерода в твердом остатке будет составлять

$$x_{c4} = x_c / (1 - x_{wb} - x_l).$$

После завершения процессов, которые тормозили прогрев частицы (удаление свободной и связанной воды, удаление летучих) и были причиной возникновения температурного градиента по радиусу частицы, на этапе выгорания углеродного остатка ее можно рассматривать как объект с сосредоточенными параметрами.

Вследствие высокой температуры частицы, процесс выгорания происходит в диффузионной области. Его скорость определяется скоростью поступления кислорода к реагирующей поверхности и зависит от коэффициента массоотдачи и мольной концентрации кислорода c_{O_2} . С учетом высокой порозности частицы можно считать, что концентрация кислорода в ядре газовой фазы при реагирующей поверхности равна ее концентрации в газовой фазе, окружающей частицу. Мольная концентрация кислорода при температуре газовой фазы t_{gas} равна:

$$c_{O_2} = x_{O_2} / [Rg (t_{gas} + 273,15)],$$

где x_{O_2} — объемная доля кислорода в газовой фазе.

Уравнения изменения температуры частицы и радиуса реагирующей поверхности имеют вид:

$$d\theta / d\tau = 3 / (r \rho_{s4} c_{s4}) [\varepsilon \mu_c \beta H_c c_{O_2} / (1 - \varepsilon) + \alpha_{con} t_{gas} + \alpha_{rad} t_{fac} - (\alpha_{con} + \alpha_{rad}) \theta]; \quad (16)$$

$$dr / d\tau = -\varepsilon \mu_c \beta / [\rho x_{s4} (1 - \varepsilon)]. \quad (17)$$

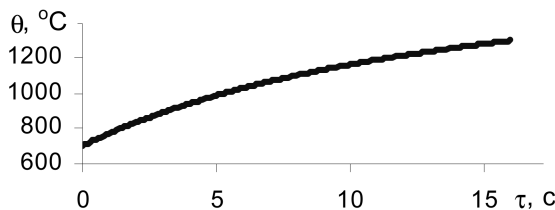


Рис.5. Изменение температуры частицы на этапе выгорания углеродного остатка.

Таблица 1. Динамика изменения радиуса непрореагировавшего ядра r и температуры углеродного остатка θ

τ, с	r, м	dθ/dτ	θ, °C
0	0,001500	75,61671	700
1	0,001494	66,95099	771,5877
2	0,001476	59,68336	835,1660
3	0,001446	53,52827	891,9975
4	0,001406	48,26935	943,0929
5	0,001353	43,74025	989,2697
6	0,001289	39,81129	1031,197
7	0,001214	36,38015	1069,427
8	0,001127	33,36514	1104,419
9	0,001028	30,70025	1136,558
10	0,000918	28,33151	1166,170
11	0,000797	26,21406	1193,530
12	0,000664	24,30968	1218,871
13	0,000519	22,58410	1242,390
14	0,000363	21,00227	1264,253
15	0,000196	19,51086	1284,580
16	1,65E-05	17,64279	1303,381

Начальные условия для (16) определяются значением температуры поверхности частицы на момент окончания удаления летучих, а для (17) равняются радиусу частицы R_0 .

Результаты расчета, отображающие изменение температуры частицы и радиуса реагирующей поверхности с момента окончания горения летучих на поверхности частицы и начало горения собственно углеродного остатка (в рассматриваемом случае это через 9 с после вбрасывания частицы в горячую зону), представлены в табл.1 и на рис.5.

На рис.6 сведены все этапы сжигания древесной частицы: разогрев, удаление свободной

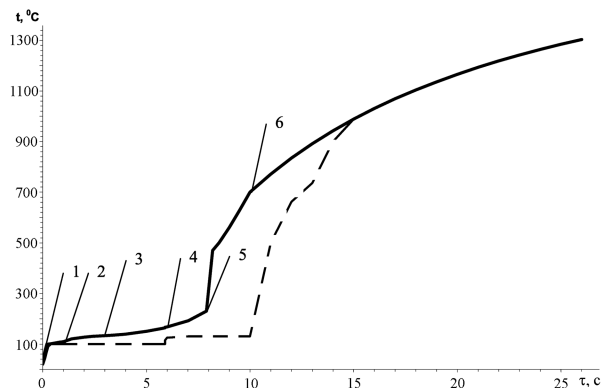


Рис.6. Изменение температуры центра (пунктир) и поверхности частицы (сплошная линия) за время ее сгорания: 1 — прогрев частицы до 100 °C и начало удаления свободной влаги; 2 — начало удаления связанной влаги; 3 — начало выделения летучих; 4 — полное удаление свободной влаги; 5 — начало горения летучих на поверхности частицы; 6 — полное сгорание летучих и начало горения коксового остатка.

и связанной влаги, выделение и сгорание летучих компонентов, горение углеродного остатка частицы. Учитывая, что некоторые теплофизические параметры для древесной частицы не известны или определены с большим диапазоном погрешности, приведенные расчеты должны уточняться по мере установления более точных значений указанных параметров.

Кроме того, дальнейшее исследование должно отдельно учитывать отличие формы реальных древесных частиц от сферической, а также характер распределения в них пор. Подобный учет необходимо связан с некоторой модификацией ряда уравнений, описывающих тепло- и массоперенос, а также соответствующих граничных условий. В то же время указанные этапы процесса горения древесных частиц и процедура их математического остаются неизменными.

Выводы

Прогрев древесной частицы с исходным диаметром 3 мм, начальной относительной влажностью 13 %, температурой 20 °С и исходной порозностью 0,8 в окружающей среде с температурой 900 °С до температуры активного удаления свободной влаги 100 °С происходит примерно за 0,4 с.

Через 1,4 с поверхность частицы прогревается до 120 °С, что приводит к протеканию одновременных процессов: удаление свободной влаги из более глубоких слоев частицы; с ее поверхности начинается удаление связанной влаги. При этом фронт свободной влаги при фиксированной температуре 100 °С и фронт связанной влаги при постоянной температуре 120 °С продвигаются к центру частицы, а температура поверхности частицы непрерывно растет.

При прогреве поверхности частицы до 130 °С начинается выделение летучих, образуется фронт удаления летучих, движущийся к центру частицы. Этот момент происходит на 3-й с от

начала прогрева частицы. При этом в центре частицы имеется неудаленная свободная и связанная влага. Наличие указанных трех фронтов (удаление свободной и связанной влаги и выделение летучих) тормозит прогрев частицы, поскольку тепло из окружающей среды расходуется на испарение влаги и выделение летучих. Полное удаление свободной влаги наступает через 5,8 с, при этом поверхность частицы прогревается до 165 °С.

На 8-й с поверхность частицы прогревается до 230 °С и начинается горение летучих. При этом внутри частицы имеется еще не удаленная связанная влага. Полное удаление связанной влаги наступает через 8,5 с, при этом поверхность частицы прогревается до 700 °С. Далее происходит активное выделение летучих и их сгорание на поверхности частицы или вне ее в зависимости от интенсивности поступления окислителя к горючей массе. Несмотря на высокую температуру частицы (700 °С) углеродный остаток не горит из-за отсутствия кислорода, который весь расходуется на сжигание летучих. Полное сгорание летучих происходит на 10-й с, вся частица при этом прогревается до 700 °С и начинается горение углеродного остатка.

Сгорание углеродного остатка происходит за 16 с, температура частицы достигает при этом 1300 °С.

Таким образом, общее время сгорания древесной частицы с описанными выше параметрами составляет 26 с, что практически совпадает с экспериментально определенной величиной [1].

Список литературы

1. Карп И.Н., Провапов А.Ю., Пьяных К.Е., Юдин А.С. Исследование динамики выгорания древесных опилок и луги подсолнечника в кипящем слое // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2010. — № 3. — С. 9–13.

Поступила в редакцию 16.06.10

Mathematical Modelling of a Wood Particle Combustion Process

*Karp I.N., Kolesnik V.V., Orlyk V.N.,
Pyanykh K.E., Yudin A.S.*

The Gas Institute of NASU, Kiev

The physical model of a wood particle is substantiated. The mathematical model of a motionless particle burning process in an oxygen content stream is elaborated. Detailed numerical research of stages of a warming up, removal of a moisture, release and combustion of wood-volatile components, burning of the particle carbon rest is carried out. Temperature levels and duration of the specified stages are defined.

Key words: moisture, evaporation, volatile, combustion, carbon rest, time of burning.

Received June 16, 2010