

Расчет времени термообработки графита в псевдооживленном слое

Сидоренко О.С.¹, Сидоренко С.В.², Кожан А.П.³,
Бондаренко О.Б.³, Ивачкин Я.А.³

¹ Институт коллоидной химии и химии воды НАН Украины, Киев

² Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев

³ Институт газа НАН Украины, Киев

Предложены физическая и математическая модели процесса термообработки графита в аппаратах с псевдооживленным слоем. Модели позволяют рассчитать время процесса для стадий: подогрев и сушка цилиндрических окатышей графита; дальнейший подогрев и дробление графита; терморасщепление, вспучивание графита (до температуры 300 °С); вынесение чешуек графита при температуре не менее 600 °С.

Ключевые слова: термообработка графита, псевдооживленный слой, математическая модель.

Запропоновано фізичну та математичну моделі процесу термообробки графіту в апаратах з псевдозрідженим шаром. Моделі дозволяють розрахувати час процесу для стадій: підігрів та сушіння циліндричних окатишів графіту; подальший підігрів та дроблення графіту; терморозщеплення, вспучування графіту (до температури 300 °С); винесення лусочок графіту при температурі не менш 600 °С.

Ключові слова: термообробка графіту, псевдозріджений шар, математична модель.

Проблема получения вспученного графита актуальна, так как графит находит широкое применение при решении вопросов защиты окружающей среды, а также в энергетических устройствах, где существует необходимость отвода больших количеств тепла с помощью кипящих наножидкостей.

Физическая и математическая модели процесса терморасщепления графита в псевдооживленном слое имеют четыре стадии: I — нагревание окатыша от начальной температуры до температуры влажного термометра, сушка; II — дальнейшее нагревание окатыша до 150 °С с одновременным его измельчением, измельчение до более мелких частиц; III — повышение температуры до 300 °С во всем объеме окатыша с послынным отшелушиванием графита; IV — прокаливание чешуек графита, насыпная плотность которых уменьшается в 200 раз при 550–600 °С [1, 2].

В данной статье приведен числовой пример расчета, который позволяет оценить влияние каждой стадии процесса термообработки на один из основных параметров процесса — время пребывания графита в реакционной зоне печи.

Исходные данные и основные условные обозначения приведены ниже:

Масса окатыша m_0 , кг	—	0,015
Диаметр и длина окатыша $d_0 \times l_0$, м	—	0,024×0,04
Усредненный диаметр графитового осколка d_{vc} , м	—	0,014
Начальная температура графита t_0 , °С	—	20
Температура псевдооживленного инертного слоя $t_{ис}$, °С	—	900
Температура газового потока $t_{гп}$, °С	—	1000
Начальная влажность графита ω_1 , % (мас.)	—	40
Начальная плотность графита ρ_0 , кг/м ³	—	1000
Удельная теплоемкость графита C_p , Дж/(кг·К)	—	2200
Усредненный коэффициент теплопроводности графита $\lambda_{тр}$, Вт/(м·К)	—	2
Скорость газового потока W , м/с	—	0,65
Температура осколков после II стадии термообработки графита t_2 , °С	—	150
Температура начала вспучивания чешуек графита t_3 , °С	—	180
Температура завершения вспучивания и отшелушивания чешуек графита t_0' , °С	—	300
Температура чешуек при прокаливании $t_{тр}$, °С	—	600

Методика расчета времени термообработки графита приводится в работе [1].

I стадия. Продолжительность сушки определяется по формуле А.В.Лыкова [3]:

$$t_c = \{ \omega_1 - \omega_k + 2,3 (\omega_k + \omega_p) \lg [(\omega_k - \omega_p) / \omega_2 - \omega_p] \} / N_c, \quad (1)$$

где ω_1 — начальная влажность графита; ω_k — критическая влажность; ω_p — равновесная влаж-

Таблица 1. Результаты экспериментов по определению скорости сушки

Показатель	Номер эксперимента									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\omega_0, \%$ (мас.)	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5
τ, c	35	28	24	23	21	19	17	14	11	3

ность; ω_2 — влажность материала после сушки; N_c — скорость в первый период сушки.

Экспериментально определялись параметры для расчета по формуле (1). Окатыши окисленного графита с фиксированной влажностью вбрасывались на поверхность псевдоожиженного слоя зерен корунда. Определялось время от момента попадания окатыша в слой до начала его дробления. Экспериментально установлено, что процессу дробления отвечает температура 150 °С. Согласно результатам термомассовых исследований, основанная влага удаляется при 50–100 °С, то есть к моменту, когда температура достигает 150 °С, влага в образце отвечала приблизительно равновесной. Все эксперименты были проведены для окисленного графита с влажностью 5–50 % (мас.) через каждые 5 %. Результаты замеров представлены в табл.1. По этим данным построена кривая сушки (рис.1).

Для получения данных о скорости сушки проводилось графическое дифференцирование кривой сушки (рис.2). На основании кривой установлено, что в первый период скорость сушки составляла $N_c = 2,4 c^{-1}$, первая критическая влажность $\omega_k = 20 \%$, равновесная влажность $\omega_p = 5 \%$. Принималось, что приведенная критическая влажность равняется ω_k и влажность материала после сушки $\omega_2 = 5,5 \%$.

Для принятых исходных данных и экспериментально определенных параметров время сушки, согласно формуле (1), равняется 27,2 с.

$$\tau_c = \{N_c [\omega_1 - \omega_k + 2,3 (\omega_k - \omega_p) \lg ((\omega_k - \omega_p) / (\omega_2 - \omega_p))]\}^{-1} = [40 - 20 + 2,3 (20 - 5) \lg ((20 - 5) / (5,5 - 5))] / 2,4 = 27,2 c.$$

II стадия. На этой стадии происходит нагревание окатышей от температуры влажного термометра $t_{вт} = 75$ °С до температуры распада окатыша на осколки $t_2 = 150$ °С. Обе температуры определялись экспериментально [1].

Для расчета времени нагревания окатыша на II стадии использовалась теорема о перемножении решений [4], на основе которой безразмерная температура θ цилиндра (окатыша) конечных размеров при нагревании равняется произведению безразмерных температур тел,

при пересечении которых он образовался, то есть бесконечной пластины и бесконечного цилиндра [1]. Использовались дополнительные данные и выполнялись предварительные расчеты. Так, для определения критерия Bi рассчитывался коэффициент теплоотдачи от высокотемпературного псевдоожиженного инертного слоя (ПС) к термообрабатываемым окатышам графита α . При этом использовалось следующее соотношение, учитывающее лучистую составляющую, $Вт / (м^2 \cdot К)$ [5]:

$$\alpha = \alpha_T K_{II} = 35,7 \rho^{0,2} \lambda^{0,6} d^{-0,36} [1 + (10^4 d - 2,5 / 11,7)(0,296 t^{0,22} - 1)] = 35,7 \cdot 3000^{0,2} \times 0,1^{0,6} \cdot (10^{-3})^{-0,36} [1 + (10^4 \cdot 10^{-3} - 2,5 / 11,7) (0,296 \cdot 1000^{0,22} - 1)] = 645, \quad (2)$$

где ρ — плотность материала ПС (корунда), $\rho = 3000$ кг/м³; λ — теплопроводность псевдоожиженного газа, $\lambda = 0,1$ Вт/(м·К); d — размер частиц корунда в псевдоожиженном слое, $d = 0,001$ м.

В критерий F_0 входит коэффициент температуропроводности графита, м²/с:

$$\alpha = \lambda_{гр} / (\rho_0 c_p) = 2 / (10^3 \cdot 2200) = 0,9 \cdot 10^{-6}. \quad (3)$$

Для расчета времени была применена следующая методика [4]. Принимался ряд значений времени нагревания и по ним рассчитыва-

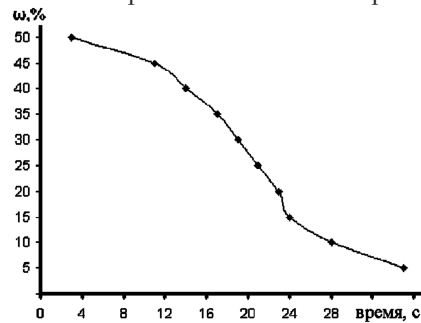


Рис.1. Кривая сушки окатышей графита.

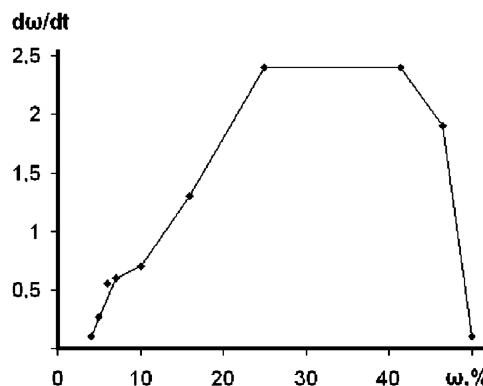


Рис.2. Кривая скорости сушки окатышей графита.

лись соответствующие критерии F_0 . Согласно полученным графикам в зависимости от V_1 и F_0 определялись безразмерные температуры θ по осям бесконечных цилиндра и пластины.

Полученное значение безразмерной температуры для тела конечных размеров (цилиндра), каким и есть графитовый окатыш, позволило определить действительное значение температуры по оси цилиндра. Расчеты прекращались при достижении заданной температуры t_2 .

Далее приводится пример расчета для случая $t_2 = 150^\circ\text{C}$.

Для цилиндра:

$$Bi_{\text{ц}} = \alpha r / \lambda = 645 \cdot 0,01 / 2 = 3,2; \quad (4)$$

$$Fo_{\text{ц}} = a' \tau / r^2 = 0,9 \cdot 10^{-6} \cdot 15 / 0,01^2 = 0,135, \quad (5)$$

где $r = d_{\text{оск}} / 2 = 20 / 2 = 10 \text{ мм} = 0,01 \text{ м}$ ($d_{\text{оск}}$ — диаметр осколка).

На основании диаграмм [4] для полученных $Bi_{\text{ц}}$ и $Fo_{\text{ц}}$ находим $\theta = 0,85$.

Аналогично для пластины:

$$Bi_{\text{пл}} = \alpha r / \lambda = 645 \cdot 0,02 / 2 = 6,45;$$

$$Fo_{\text{пл}} = a' \tau / \delta^2 = 0,9 \cdot 10^{-6} \cdot 15 / 0,022^2 = 0,0034,$$

где $\delta = 0,5 L_{\text{ок}} = 0,5 \cdot 0,04 = 0,02 \text{ м}$.

Тогда $\theta_{\text{пл}} = 1$ [4].

Таким образом,

$$\theta = \theta_{\text{ц}} \theta_{\text{пл}} = 0,85 \cdot 1 = 0,85; \quad (6)$$

$$\theta = (t_{\text{к}} - t) / (t_{\text{к}} - t_0) = (900 - t) / (900 - 20) = 0,85. \quad (7)$$

Откуда $t_2 = 150^\circ\text{C}$.

Таким образом, можно принять расчетное время нагревания окатыша до 150°C равным 15 с.

III стадия. Результаты расчета времени термообработки на данной стадии представлены

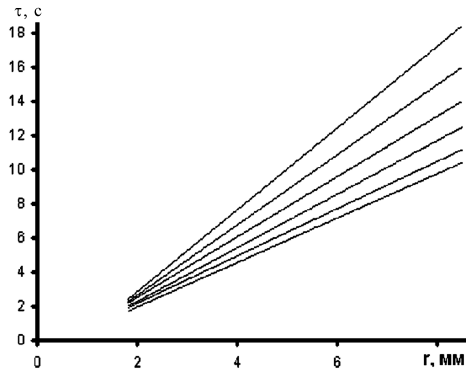


Рис.3. Зависимость времени термообработки графита на III стадии от исходных размеров осколков при разных значениях температуры псевдоожигенного слоя, $^\circ\text{C}$: 1 — 700; 2 — 800; 3 — 900; 4 — 1000; 5 — 1100; 6 — 1200.

графически на рис.3. Расчеты для построения семейства кривых выполнены в работах [1, 2]. При этом изменялись входные данные: диаметр осколков и температура псевдоожигенного инертного слоя. Так, для осколков радиусом 0,007 м, температурой $t_{\text{ПС}} = 900^\circ\text{C}$ и при других исходных данных, принятых в начале расчета, время терморасщепления составило 11,7 с.

IV стадия. На данной стадии отшелушенные чешуйки графита проносятся через зону прокаливания, имея на входе температуру $t_0' = 300^\circ\text{C}$, а на выходе их температура должна быть около $t_{\text{гр}} = 600^\circ\text{C}$. Целью расчета является определение температуры $t_{\text{пр}}$, обеспечивающей достижение $t_{\text{гр}}$ за время пребывания частиц в зоне прокаливания. Зададимся минимальной высотой данной зоны, пусть $h_{\text{пр}}^{\text{min}} = 1,25 \text{ м}$. Определим скорость выноса в этой зоне, приняв по предварительным расчетам $t_{\text{пр}} = 1100^\circ\text{C}$. При данной температуре для воздуха $v_{\text{в}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, $\lambda = 0,11 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, $\rho = 0,257 \text{ кг}/\text{м}^3$, $Pr = 0,57$. На основании замеров размеров чешуек принимаем $A \times B \times C = 0,0035 \times 0,00065 \times 0,0003 \text{ мм}$. Эквивалентный диаметр определим как диаметр шара с объемом, равновеликим объему частицы, м:

$$d_{\text{эКВ}} = [(6 V_{\text{ч}}) / \pi]^{0,33} = [(6 \cdot 3,5 \cdot 0,65 \cdot 0,3) / \pi]^{0,5} = 1,14 \text{ мм} = 0,00114, \quad (8)$$

а фактор формы для несферических частиц по уравнению [6]:

$$\psi_{\text{ф}} = [(0,207 S) / V^{2/3}]^{0,5} = [0,207 \cdot 2(3,5 \cdot 0,65 \cdot 3,5 \cdot 0,3 + 0,65 \cdot 0,3) / (3,5 \cdot 0,65 \cdot 0,3)^{2/3}]^{0,5} = 1,3, \quad (9)$$

где S, V — поверхность и объем частицы.

Тогда критерий Архимеда:

$$Ar = (g d_{\text{эКВ}}^3 / \nu^2) (\rho_{\text{ГР}} / \rho_{\text{В}}) = [9,81 \times (1,14 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 100] / [(2 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 0,257] = 141, \quad (10)$$

где $\rho_{\text{ГР}}$ — кажущаяся плотность чешуек вспученного графита, $\rho_{\text{ГР}} = 100 \text{ кг}/\text{м}^3$.

При порозности слоя $\varepsilon = 1$, что соответствует режиму уноса, с учетом фактора формы (9):

$$Re_{\text{ВИТ}} = (Ar \psi_{\text{ф}}) / [18 + 0,6 Ar^{0,5}] = (141 \cdot 1,3) / [18 + 0,6 (141)^{0,5}] = 7,2. \quad (11)$$

Откуда скорость уноса, м/с:

$$W_{\text{у}} = (Re_{\text{ВИТ}} \nu) / d_{\text{эКВ}} = (7,2 \times 2 \cdot 10^{-4}) / (1,14 \cdot 10^{-3}) = 1. \quad (12)$$

Следовательно, время пребывания чешуйки в зоне прокаливания, с:

$$\tau = h/W_y = 1,25/1 = 1,25. \quad (13)$$

За это время чешуйка графита должна нагреться до $t_{гр} = 600$ °С, а температура газов в зоне прокаливания должна быть $t_{пр} \geq 1000$ °С. Эта температура (°С) рассчитана на основании уравнения (6), которое имеет вид:

$$t_{пр} = (t_{гр} - t_0 e^{-K\alpha\tau} / (1 - e^{-K\alpha\tau})) = (600 - 300 e^{-0,38 \times 1,5}) / (1 - e^{-0,38 \times 1,5}) = 1089, \quad (14)$$

где константа $K\alpha$ определялась по уравнению:

$$K\alpha = (6 \alpha) / (\rho_{гр} C_p^{гр} d_{экр}) = (6 \cdot 16) / (100 \cdot 2200 \cdot 1,09 \cdot 10^{-3}) = 0,38, \quad (15)$$

где $C_p^{гр}$ — теплоемкость графита, определялась экспериментально на измерителе теплоемкости ИТ-С-400 [1].

Коэффициент теплоотдачи α определялся по уравнению [5]:

$$Nu = 1,6 \cdot 10^{-2} (Re_{вит}/\epsilon)^{1,3} (Pr)^{0,33} = 1,6 \cdot 10^{-2} (7,2/1)^{1,3} \cdot (0,57)^{0,33} = 0,165, \quad (16)$$

откуда

$$\alpha = (Nu \lambda_B) / d_{экр} = (0,165 \cdot 0,11) / (0,114 \times 10^{-3}) = 16 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Таким образом, расчет суммарного времени для четырех этапов термообработки окатышей графита массой 0,015 кг в аппарате с псевдоожиженным слоем зерен корунда диаметром 0,001–0,002 м, нагретом до 900 °С, температуре 1090 °С в зоне прокаливания, определяется по формуле $\Sigma\tau = \tau_c + \tau_n + \tau_{тр} + \tau_{пр} = 27,2 + 15 + 11,7 + 1,25 = 55,1$ с.

Выводы

Время термообработки графита в псевдоожиженном слое, рассчитанное по предложенной методике, достаточно близко совпадает с экспериментальными данными при получении вспученного графита, что свидетельствует о корректности примененных физической и математической моделей. Разработанная методика может найти применение при проектировании печей для термообработки графита с инертным кипящим слоем.

Список литературы

1. Сидоренко А.С. Процесс получения терморасширенного терморасщепленного графита : Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 1992. — 120 с.
2. Ружинская Л.И., Сидоренко А.С., Сидоренко С.В. и др. Математическая модель процесса терморасщепления интеркалированного графита // Экотехнологии и ресурсосбережение. — 2007. — № 3. — С. 73–76.
3. Лыков А.В. Теория теплопроводности. — М. : Гос-техтеоретиздат, 1952. — 325 с.
4. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. — М.; Л. : Энергия, 1965. — 424 с.
5. Забродский С.С. Гидродинамика и теплообмен в псевдоожиженном (кипящем) слое. — М.; Л. : Госэнергоиздат, 1963. — 488 с.
6. Гинзбург А.С., Резчиков В.А. Сушка пищевых продуктов в кипящем слое. — М. : Пищ. пром-сть, 1966. — 196 с.
7. Донской А.В., Клубникин В.С. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении. — Л. : Машиностроение, 1979. — 221 с.

Поступила в редакцию 06.06.10

Graphite Heat Treatment in Fluidized Bed Time Calculation

**Sidorenko A.S.¹, Sidorenko S.V.², Kojan O.P.³,
Bondarenko O.B.³, Ivachkin Ya.A.³**

¹ Institute of Colloid Chemistry and Water Chemistry of NASU, Kiev

² National Technical University of Ukraine «KPI», Kiev

³ The Gas Institute of NASU, Kiev

Physical and mathematical models of graphite heat treatment process in fluidized bed apparatus are proposed. The models allow to calculate process time for the stages: heating and drying of graphite cylindrical pellets; graphite further heating and crushing; graphite thermal decomposition and swelling (up to 300 °С); graphite cells removal at not less than 600 °С.

Key words: graphite heat treatment, fluidized bed, mathematical model.

Received June 6, 2010