

Особенности процессов нагрева углеродсодержащего сырья в электротермических печах кипящего слоя

На основе математического моделирования исследованы процессы нагрева углеродсодержащих материалов в высокотемпературных электротермических печах кипящего слоя. Выполнен анализ факторов, определяющих длительность термообработки и качество готовой продукции. Изучено влияние дискретной загрузки/выгрузки материала на динамику его энтальпии. Для предложенного способа подачи материала определены условия стабильного электротермического режима. Ил. 5. Табл. 1. Библиогр.: 7 назв.

Ключевые слова: электротермическая печь, кипящий слой, углеродсодержащий материал, способ подачи, качество продукции

By simulation studied a process of carbonaceous materials heating in high-temperature thermal-electric fluidized bed furnaces. The analysis of factors determining the duration of heat treatment and finished product quality. The effect of discrete load / unload the material on the dynamics of its enthalpy researched. In the proposed supplying method defined the conditions of stable electro-thermal regime.

Keywords: thermal-electric furnace, fluidized bed, carbonaceous material, supplying method, product quality

Анализ состояния применения электротермических печей

В зарубежной практике для переработки углеродных материалов хорошо зарекомендовали себя высокотемпературные электротермические печи кипящего слоя [1-3] (ЭТПКС, рис. 1). В подобных агрегатах высокая температура процесса 2000-3000 °С достигается в результате прохождения электрического тока через слой электропроводного материала и выделения значительной тепловой мощности в ограниченном объеме (до 15 МВт/м³). Интенсивное перемешивание материала в состоянии псевдооживления способствует выравниванию температурного поля в активной зоне нагрева. Благодаря перечисленным особенностям эти печи являются компактными, имеют высокую производительность (до 2 т/ч) и могут применяться как для графитизации углеродсодержащего сырья, удаления химических и органических примесей из загрязненного графита, так и кальцинирования коксов различного происхождения [3-4].

Несмотря на очевидные положительные стороны, актуальными для ЭТПКС остаются проблемы конструирования, выбора технологических режимов, однородности готовой продукции, стойкости центрального электрода, контроля температуры, надежности и стабильности электротермического процесса, а также утилизации теплоты готового продукта [5]. Комплексное решение этих задач имеет большее научно-практическое значение.

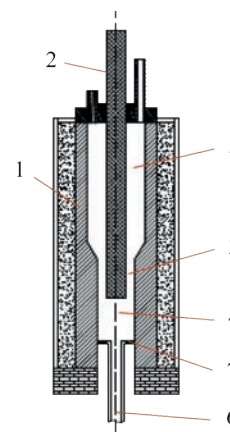


Рис. 1. Принципиальная схема электротермической печи кипящего слоя:
1 – футеровка; 2 – центральный электрод;
3 – активная зона нагрева; 4 – подэлектродное пространство; 5 – надслоевое пространство;
6 – канал готового продукта;
7 – распределительная решетка

Цели и задачи исследования

Одним из важных вопросов эксплуатации ЭТПКС является выбор длительности термообработки τ_0 , численно равной отношению емкости E к производительности печи G . Основным критерием в данном случае выступает качество. Из практического опыта, время пребывания материала в активной зоне нагрева должно составлять порядка 20 мин, что гарантирует высокие потребительские свойства готовой продукции [6]. В этом интервале протекают многостадий-

ные процессы удаления сторонних примесей и перестройки атомарной структуры углерода. Особую роль в кинетике химических превращений играет начальный момент времени, сопряженный с нагревом материала, поскольку температура определяет дальнейшую динамику указанных процессов [7]. Однако следует понимать, что τ_0 – это некоторый среднеинтегральный показатель.

В действительности однокамерные аппараты кипящего слоя в условиях хорошего перемешивания характеризуются стохастическим выходом материала, когда все частицы имеют практически одинаковую вероятность покидания слоя. При этом массовая доля частиц, покинувших слой, во времени подчиняется экспоненциальному закону (рис. 2). Как видно, относительно некоторого начального момента за период $\tau \leq \tau_0$ из аппарата кипящего слоя выходит всего 62 % от исходного сырья, значительная часть из которых является недоработанной. Оставшиеся же 38 %, напротив, передерживаются сверх нормы.

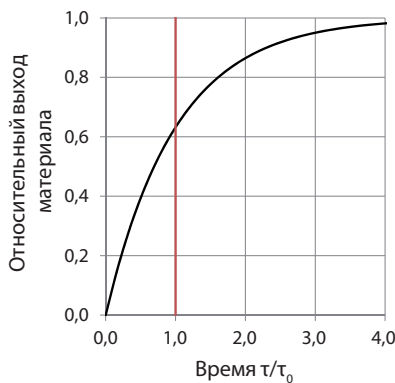


Рис. 2. Динамика выхода материала из кипящего слоя 2

Кроме того, возможный выход некондиционного продукта необходимо рассматривать в контексте технологии загрузки/выгрузки (рис. 1). Материал из приемного бункера подается в печь шнековым питателем, при этом агрегаты частиц движутся в свободном падении по вертикальным подводным каналам, проходя путь длиной в 3-5 м [6]. У поверхности кипящего слоя скорость таких агрегатов может достигать 5-10 м/с. Таким образом, не исключен транзитный проскок сырого материала из активной зоны нагрева высотой 0,5-1,5 м в подэлектродный участок (рис. 1), когда температура нагрева частиц будет значительно меньше расчетной температуры печи.

В этой связи, предметом данной работы явилось исследование динамики нагрева углеродсодержащих частиц в высокотемпературном электротермическом кипящем слое с учетом

особенностей загрузки/выгрузки материала и разработка технических предложений по улучшению качества термообработки.

Анализ процессов нагрева при непрерывной подаче материала

Основными механизмами нагрева дисперсного материала в ЭТПКС являются излучение, резистивный нагрев и конвекция. Эти процессы описываются известными уравнениями теплообмена:

$$q_{\text{л}} = \frac{\sigma_0 \cdot (T_n^4 - T_u(\tau)^4)}{(1/\epsilon_m + 1/\epsilon_{\text{кк}} - 1)}; \tag{1}$$

$$q_{\text{к}} = \alpha_{\text{к}} \cdot (T_n - T_u), \quad Nu = 1,6 \cdot 10^{-2} \cdot Pr^{0,33} \cdot \left(\frac{Re}{\xi}\right)^{0,33}; \tag{2}$$

$$q_{\text{эл}} = N_{\text{пол}} / F_{\text{сл}}, \quad \text{Вт} / \text{м}^2 \tag{3}$$

где $q_{\text{л}}, q_{\text{к}}, q_{\text{эл}}$ – плотность теплового потока на поверхность частицы, соответственно, излучением, конвекцией и джоулевой теплоты, Вт/м²; $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·К⁴ – постоянная Стефана-Больцмана; T_n – температура печи, К; $T_u(\tau)$ – температура частицы во времени, К; $\epsilon_m = 0,85$ – степень черноты графита; $\epsilon_{\text{кк}} = \epsilon_m^{0,31}$ – степень черноты кипящего слоя; Re – число подобия Рейнольдса; Pr – число подобия Прандтля; ξ – порозность кипящего слоя на основе двухфазной модели при числе псевдооживления $W = 1,1$; $N_{\text{пол}}$ – полезная мощность, Вт; $F_{\text{сл}}$ – суммарная поверхность частиц в активной зоне печи, м².

Причем связь полезной мощности $N_{\text{пол}}$ с удельными тепловыми потоками q_i на поверхность частицы выражается законом сохранения энергии

$$N_{\text{пол}} = G \cdot f_m \cdot \int_0^{\tau} (q_{\text{л}} + q_{\text{к}} + q_{\text{эл}}) d\tau, \tag{4}$$

где G – производительность печи, кг/с; f_m – удельная поверхность материала, м²/кг; τ – время нагрева частицы, с.

Анализ составляющих результирующего теплового потока (1-3) в печи производительностью 1 т/ч (общей мощностью $N = 1,8$ МВт) показал, что для холодных частиц $d_{\text{ч}} = 0,1-2$ мм доля лучистой составляющей в теплообмене превышает 99,5 % (таблица).

Таблица

Плотность теплового потока q на поверхность частиц $d_{\text{ч}} = 2$ мм в ЭТПКС

Вид теплообмена	Значение q , кВт/м ²
Электротермический нагрев	0,2-5,0
Конвекция от газа	5-6
Излучение от слоя	4500

В таких условиях оценку термической массивности следует проводить с использованием критерия подобия Старка $Sk = \sigma_{\text{пр}} \cdot T^3 d_{\text{ч}} / 2 \cdot \lambda$.

Для экстремального варианта работы ЭТПКС ($Sk \rightarrow \max$): температура печи $t_{\text{поб}} = 3000 \text{ }^\circ\text{C}$; исходное сырье – предварительно прокаленный при температуре $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ нефтяной кокс с $\lambda = 10 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$; размер фракций $d_u = 2 \text{ мм}$, – число Sk находится в пределах $\leq 0,15$. Это позволяет считать углеродные частицы меньших размеров термически тонкими телами.

Таким образом, методика расчета времени нагрева сырья в ЭТПКС основывалась на численном решении задачи нестационарного теплообмена для сферической бесконечно теплопроводной частицы при граничных условиях III-го рода:

$$m \cdot c(T_u) \cdot \frac{\partial T_u}{\partial \tau} = q_{\text{рез}}(T_u) \cdot f_u, \text{ Вт}, \quad (5)$$

где m – масса частицы, кг; $c(T_u) = 4187 \cdot (0,443 + 0,308 \cdot 10^{-4} \cdot T_u - 0,613 \cdot 10^{-5} \cdot T_u^2 + 0,108 \cdot 10^{-8} \cdot T_u^3)$ – теплоемкость материала, Дж/кг \cdot °C; $q_{\text{рез}}$ – результирующая плотность теплового потока на поверхность частицы, Вт/м 2 ; f_u – поверхность частицы, м 2 .

Как следует из расчетной модели (1-5), длительность нагрева частиц графита $d_u = 0,1\text{-}2 \text{ мм}$ при температуре в рабочем пространстве печи $2500 \text{ }^\circ\text{C}$ составляет порядка $0,2\text{-}2,5 \text{ с}$ (рис. 3). Совместный анализ полученных результатов и динамики выхода материала из кипящего слоя (рис. 2) при непрерывной загрузке/выгрузке показал, что при среднем времени обработки $\tau_0 = 20 \text{ мин}$, доля необработанного материала не будет превышать $0,2\text{-}0,5 \%$. С увеличением τ_0 выход необработанного материала будет снижаться. Однако даже такие показатели могут оказаться неприемлемыми для отдельных потребителей высокочистого ($C > 99,99 \%$) графита.

Анализ процессов нагрева при дискретной подаче материала

Учитывая специфику конструкции ЭТПКС, по нашему мнению, целесообразно осуществ-

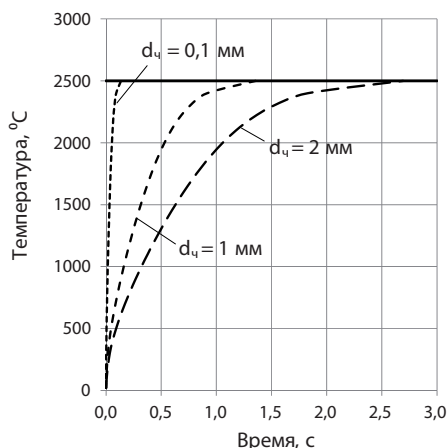


Рис. 3. Динамика температуры частиц графита в электротермическом кипящем слое при $t_{\text{поб}} = 2500 \text{ }^\circ\text{C}$

влять дискретную загрузку/выгрузку материала, когда средний период термообработки τ_0 разбивается на отдельные операционные циклы (рис. 4), каждый из которых включает три этапа: 1) стадию загрузки; 2) стадию выдержки; 3) стадию выгрузки. При этом среднее время термообработки остается без изменений, а динамика дискретного выхода некоторого количества материала отвечает идеальной модели перемешивания и повторяет кривую на рис. 2. Положительный эффект в показателях качества готовой продукции достигается за счет увеличения гарантированного времени изотермической выдержки τ_2 . Стабильность электротермического режима и потребляемой (N) и полезной ($N_{\text{пол}}$) мощности обеспечиваются в данном случае емкостью печи и частотой операционных циклов n за период τ_0 .

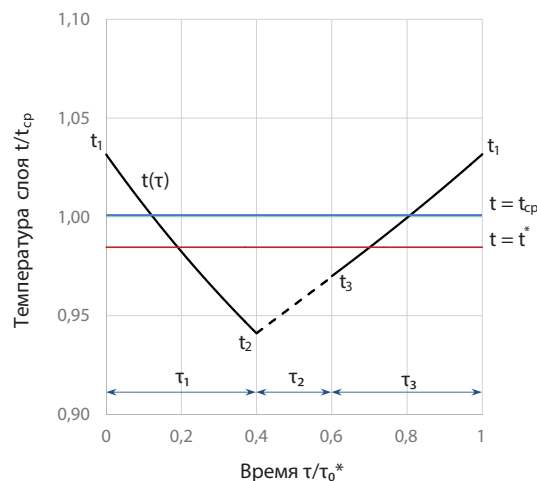


Рис. 4. Температурная диаграмма операционного цикла ЭТПКС при дискретной загрузке/выгрузке материала ($n = 5; k = 0,4$):

t_{cp} – средняя температура материала в период выгрузки; t^* – средняя температура слоя за цикл; t_1 – начальные температуры соответствующих стадий цикла; τ_0^* – длительность цикла; τ_1 – стадия загрузки; τ_2 – стадия выдержки (операционное время); τ_3 – стадия выгрузки

Принимая в качестве основных допущений равенство тепловых балансов при непрерывной и дискретной подаче материала, аккумуляцию теплоты слоем (без учета внутренних элементов рабочего пространства) и в соответствии со схемой температурной диаграммы (рис. 4), тепловой баланс ЭТПКС для трех стадий предложенного режима можно выразить системой уравнений (6-8):

$$E \cdot I_1 + Q_{\text{пол}} \cdot \tau + G_3 \cdot I_0 \cdot \tau = (E + G_3 \cdot \tau) \cdot I(\tau), \quad (6)$$

$$0 < \tau \leq \tau_1;$$

$$(E + G_3 \cdot \tau) \cdot I_2 + Q_{\text{пол}} \cdot \tau = (E + G_3 \cdot \tau) \cdot I(\tau), \quad (7)$$

$$\tau_1 < \tau \leq \tau_1 + \tau_2;$$

$$\frac{dl(\tau)}{d\tau} = \frac{Q_{пол}}{E^* - G_{\beta} \cdot \tau}, \quad \tau_1 + \tau_2 < \tau \leq \tau_0^* \quad (8)$$

$$(E + G_3 \cdot \tau) \cdot I_3 + Q_{пол} \cdot \tau = E \cdot I_1 + G_{\beta} \cdot I_{cp} \cdot \tau, \quad \tau = \tau_3,$$

где E – емкость печи, кг; G_3 – производительность системы загрузки материала, кг/с; G_{β} – производительность системы выгрузки; τ_1 – длительность стадии загрузки, с; τ_2 – длительность стадии выдержки (операционное время), с; τ_3 – длительность стадии выгрузки; I_i – энтальпия материала слоя в начале каждой стадии, Дж; I_0 – энтальпия холодного материала, Дж; I_{cp} – средняя энтальпия материала на выходе из печи; $l(\tau)$ – текущая энтальпия материала в слое, Дж.

Из решения (8) получено выражение для энтальпии материала I_1 в конце (начале) операционного цикла относительно его среднего тепло содержания на выходе из печи I_{cp}

$$\frac{I_1 - I_{cp}}{\Delta I} = k_{\beta} \cdot [(n+1) \cdot \ln(1+1/n)], \quad (9)$$

где $\Delta I = I_{cp} - I_0$ – изменение энтальпии материала в печи, Дж; $k_{\beta} = \tau_3/\tau_0^*$ – доля времени выгрузки в операционном цикле; $n = \tau_0/\tau_0^*$ – количество операционных циклов за период, равный средней длительности обработки материала в слое.

С учетом (6-7) максимальная амплитуда колебания энтальпии материала в кипящем слое составляет

$$\frac{I_1 - I_2}{\Delta I} = \frac{(1 - k_3 - k_{\beta}) + k_{\beta} \cdot (n+1) \cdot \ln(1+1/n)}{n+1}, \quad (10)$$

или для случая одинаковой длительности стадий загрузки/выгрузки ($G_3 = G_{\beta}$, $k_3 = k_{\beta} = k \leq 0,5$)

$$\frac{I_1 - I_2}{\Delta I} = \frac{1+k \cdot [(n+1) \cdot \ln(1+1/n) - 2]}{n+1}, \quad (11)$$

где $k_3 = \tau_1/\tau_0^*$ – доля времени загрузки в операционном цикле.

Как следует из выражения (11) и построенной на его основе графической зависимости (рис. 5), при дискретной подаче материала амплитуда колебания его тепло содержания в слое определяется относительной длительностью стадий загрузки/выгрузки k и количеством операционных циклов n за период среднего времени термообработки τ_0 . Причем абсолютное значение изменения энтальпии ($I_1 - I_2$) пропорционально изменению энтальпии материала в печи ΔI . Уже при $n > 20$ в интервале $k = 0,1-0,5$ амплитуда колебания энтальпии не превышает 5 % (рис. 5). Другими словами, при среднем времени обработки материала в слое $\tau_0 = 20$ мин, длительность операционного цикла τ_0^* может составлять около одной минуты, а стадия выдержки τ_2 – порядка 30 с. Этот режим обеспечивает нагрев и глубокую переработку материала с учетом его возможного проскока под электрод.

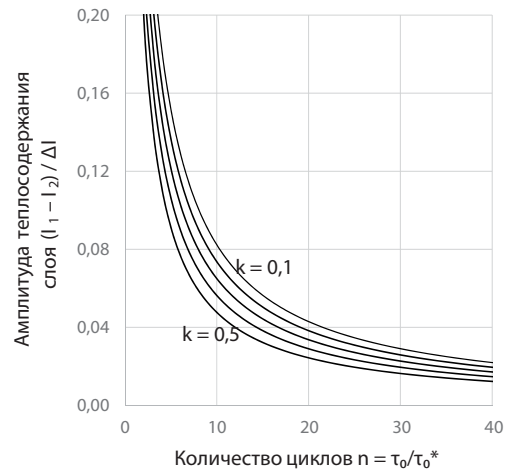


Рис. 5. Зависимость относительной амплитуды тепло содержания слоя от количества операционных циклов при различной доле времени загрузки/выгрузки материала: $k = 0,1; 0,5; \Delta k = 0,1$

Выводы

Анализ теплофизических свойств углеродсодержащих материалов (прокаленных коксов и графита), основных механизмов теплообмена и температурных режимов высокотемпературных электротермических печей кипящего слоя показал, что дисперсные углеродсодержащие частицы ($d_u = 0,1-2$ мм) нагреваются преимущественно в результате теплового излучения. Материал достигает температуры печи на протяжении первых нескольких секунд с момента попадания в активную зону нагрева. При этом в процессах математического моделирования частицы могут считаться термически тонкими телами.

Для повышения качества термообработки углеродного материала в ЭТПКС предложена его дискретная подача, когда период термообработки τ_0 разбивается на отдельные операционные циклы, каждый из которых включает стадию загрузки, выдержки и выгрузки. В таком режиме динамика дискретного выхода материала отвечает идеальной модели перемешивания, а стабильность работы печи обеспечивается емкостью печи и частотой операционных циклов n за период τ_0 .

При дискретной подаче материала амплитуда колебания тепло содержания материала в слое без учета аккумулирующих свойств элементов рабочего пространства определяется относительной длительностью стадий загрузки/выгрузки k и количеством операционных циклов n за период среднего времени термообработки. При $n > 20$ в интервале $k = 0,1-0,5$ изменение энтальпии материала не превышает 5 %.

Библиографический список

1. EUROPEAN PATENT APPLICATION № 87300021.0, Int. Cl.⁴ C01B 31/4, B01J 8/24.

Thermal purification of natural mineral carbons / W. M. Goldberger, P. R. Carney, A. K. Reed; Applicant: SUPERIOR GRAPHITE CO. EP 0 274 165 A1; Date of filing: 05.01.1987; Date of publication: 13.07.1988 // Bulletin 1988/28. – 15 p.

2. Gupta C. K. Fluid bed technology in materials processing / C. K. Gupta, D. Sathiyamoorthy. – Boca Raton, Fla.: CRC Press, 1999. – 528 p.

3. Modeling the Operation Regimes in Ultra-high Temperature Continuous Reactors: (Brookhaven National Laboratory. U. S. Department of Energy's Office of Science, USA) [Электронный ресурс] / Sergiy S. Fedorov, Mykhailo V. Gubynskiy, Igor V. Barsukov та ін. Режим доступу до матеріалів: <https://www.bnl.gov/isd/documents/86110.pdf>.

4. Печи для производства высококачественных углеродных материалов / М. В. Губинский, С. С. Федоров, Н. В. Ливитан, И. В. Барсуков, А. Г. Гогоци, Н. П. Бродниковский // Сборник докладов международной научно-практической конфе-

ренции «Теория и практика тепловых процессов в металлургии» 18-21 сентября 2012, Екатеринбург УрФУ. – С. 79-83.

5. Федоров С. С. Выбор размеров рабочего пространства электротермических печей кипящего слоя для переработки углеродных материалов / С. С. Федоров, М. В. Губинский, С. Н. Форись // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2014. – № 4. – С. 87-90.

6. Анализ энергетической эффективности печей для высокотемпературной обработки углеродных материалов / М. В. Губинский, С. С. Федоров, Н. В. Ливитан, А. Г. Гогоци, И. Барсуков, У. Рохатги // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2013. – № 2. – 8 с.

7. Ахметов М. М. Получение малосернистых коксов из сернистых нефтей. – Уфа: Изд-во ГУП ИНХП РБ, 2010. – 180 с.

Поступила 10.03.2015



УДК 669.18

Наука

Романько В. В., Романько Я. В. /к. т. н./,
Еремин А. О. /д. т. н./
НМетАУ

Определение теплового состояния сталеразливочного ковша при применении электронагрева

С помощью математического моделирования определено температурное поле сталеразливочного ковша при электрическом разогреве с последующей заливкой жидкого металла и его транспортировкой. Показано, что основным фактором определяющим снижение температуры металла в ковше является потери теплоты излучением с зеркала расплава, снижение которых возможно путем наведения шлака на его поверхности. Ил. 4. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: моделирование, разогрев, сталеразливочный ковш, распределение температуры

Temperature field of steel teeming ladle during electrical heating with further addition of a hot metal and its transportation is determined with the help of mathematical modeling. It is shown that the main factor determining reduction of metal temperature in the ladle is heat losses by emission from the melt mirror, reduction of which is possible by means of slag laying on int surface.

Keywords: modelling, heating, teeming ladle, temperature distribution

Сталеразливочный ковш обеспечивает транспортировку металла от сталеплавильного агрегата к машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), в нем производят доводку стали по химическому составу и температуре перед переливом в промежуточный ковш. Равномерный разогрев ковша перед заливкой в него жидкой стали

позволяет продлить срок службы ковша и обеспечивает минимальное снижение температуры жидкого металла, что очень важно при длительной транспортировке стали к МНЛЗ. Исключается необходимость перегрева металла в сталеплавильном агрегате, что приводит к снижению энергозатрат при выплавке стали [1, 2].