

Федоров С. С. /к. т. н./,
Губинский М. В. /д. т. н./, Форись С. Н. /к. т. н./
ИМетАУ

Исследование влияния подэлектродного участка на работу электротермических печей кипящего слоя

Изучено влияние профиля рабочего пространства высокотемпературных электротермических печей кипящего слоя для переработки углеродных материалов на их электрическое сопротивление и распределение мощности в объеме печи. Определены условия минимального тепловыделения на участке под центральным электродом. Предложены рекомендации по выбору размеров рабочего пространства печи (высоты активной зоны и подэлектродного участка), обеспечивающие стабильность электротермического режима. Ил. 4. Библиогр.: 5 назв.

Ключевые слова: переработка углеродных материалов, высокотемпературная электротермическая печь, кипящий слой, определение конструктивных параметров

Studied the influence of the working space profile of high-temperature thermal-electric fluidized bed furnaces for carbon materials processing on their electrical resistance and power distribution in the volume. The conditions for minimum heat release under the central electrode were identified. Offered the recommendations on the choice of the furnace's working space size (height of active heating zone and subelectrode area), which are provide the stability of the electro-thermal regime.

Keywords: carbon materials processing, high-temperature thermal-electric furnace, fluidized bed, design parameters definition

Общее состояние вопроса

Электротермические печи кипящего слоя (ЭТПКС, рис. 1) позволяют решать ряд технологических задач связанных с графитизацией углеродсодержащих материалов, удалением из них химических примесей и получением сверхвысоких температур (2000-3000 °С) при термообработке [1]. Это объясняет особый интерес к подобным агрегатам со стороны ведущих компаний по производству графита для нужд машиностроения, энергетики и металлургии.

Выбор рациональных конструкций ЭТПКС сопряжен с необходимостью учета сложных взаимосвязанных физических процессов: тепло-массообмена, электропроводности, гидродинамики кипящего слоя [2-5], которые, в свою очередь, зависят от рабочей температуры, производительности агрегата, природы и фракционного состава сырья. Выполненный в [1] параметрический анализ связей эксплуатационных режимов с конструкцией рабочего пространства печи позволил сформулировать основные принципы расчета размеров активной зоны нагрева и центрального электрода. Однако при решении этой задачи не учитывалось влияние проводимости подэлектродного участка (рис. 1).

Цели и задачи исследований

Из-за увеличения поперечного сечения шахты ЭТПКС под электродом газа (рис. 1) скорость инертного газа принимает меньшие зна-

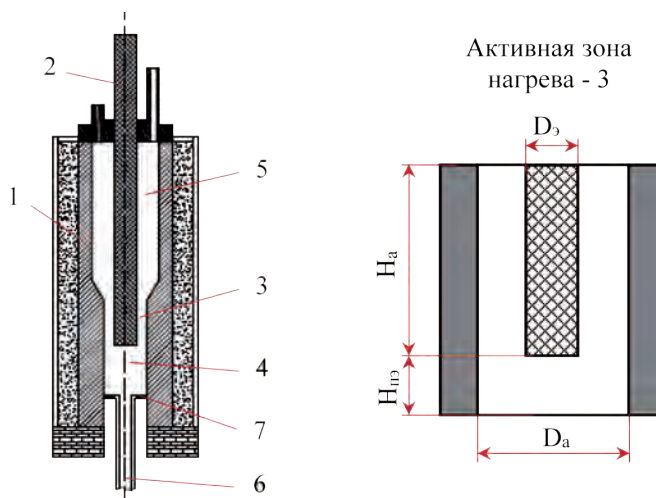


Рис. 1. Принципиальная схема электротермической печи кипящего слоя [1]:
1 – графитовая футеровка; 2 – центральный графитовый электрод; 3 – активная зона нагрева; 4 – подэлектродное пространство; 5 – надслоевое пространство; 6 – канал готового продукта; 7 – графитовая распределительная решетка; H_a , D_a – высота и диаметр активной зоны; $H_{пз}$ – высота подэлектродного участка; $D_{эл}$ – диаметр центрального электрода

чения по сравнению с межэлектродным промежутком. Таким образом, слой под центральным электродом пребывает в состоянии «минимального» псевдооживления с меньшей интенсивностью перемешивания материала. Это может привести к шунтированию активной зоны, превышению пределов допустимой плотности тока на торце электрода и выделению значительной тепловой мощности в сравнительно небольшом объеме, что негативно скажется на работе печи в целом. Указанная проблема может быть устранена путем выбора соответствующей конфигурации рабочего пространства и рациональных аэродинамических режимов.

Цель работы

Определение условий, соответствующих минимальному тепловыделению за пределами активной зоны электротермической печи кипящего слоя.

Методика проведения исследований

Для решения поставленной задачи проведено численное моделирование растекания тока в активной зоне и подэлектродном участке. В качестве основных допущений приняты изотропные свойства проводящей среды и идеальный контакт кипящего слоя с центральным электродом, футеровкой и распределительной решеткой (рис. 2).

Математическая постановка задачи включала безразмерное дифференциальное уравнение Лапласа в цилиндрических координатах:

$$\frac{1}{\bar{R}} \cdot \frac{\partial}{\partial \bar{R}} \left(\bar{R} \cdot \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \bar{R}} \right) + \frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial \bar{H}^2} = 0; \tag{1}$$

где $\bar{\varphi}$ – относительный потенциал; \bar{R}, \bar{H} – относительные радиус и высота рабочего пространства.

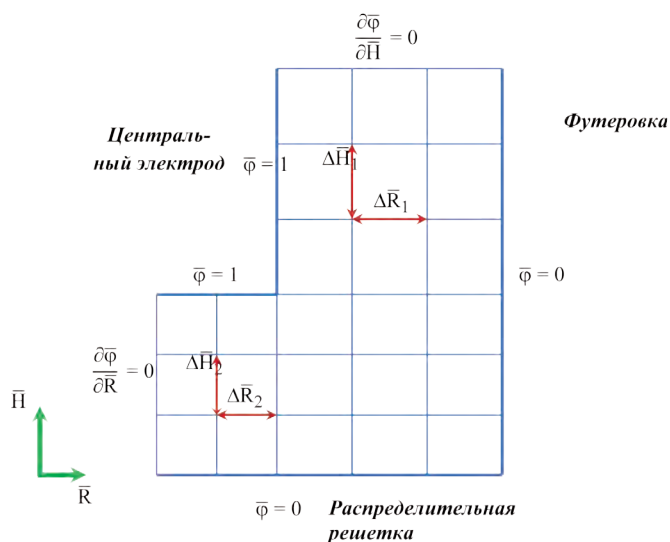


Рис. 2. Расчетная схема потенциальной задачи растекания электрического тока в кипящем слое

При этом принимались следующие граничные условия:

- на поверхности центрального электрода

$$\bar{H} \in [H_{\text{пз}} / (H_{\text{пз}} + H_a); 1], \bar{R} = D_3 / D_a$$

$$\text{и } \bar{H} = H_{\text{пз}} / (H_{\text{пз}} + H_a), \bar{R} \in [0; D_3 / D_a]:$$

$$\bar{\varphi} = 1; \tag{2}$$

- на поверхности футеровки и распределительной решетки

$$\bar{H} \in [0; 1], \bar{R} = 1 \text{ и } \bar{H} = 0, \bar{R} \in [0; 1]:$$

$$\bar{\varphi} = 0; \tag{3}$$

- на оси симметрии печи (при $\bar{R} = 1$):

$$\frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \bar{R}} = 0; \tag{4}$$

- на свободной поверхности кипящего слоя

$$\bar{H} = 1, \in [D_3 / D_a; 1]:$$

$$\frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \bar{R}} = 0. \tag{5}$$

Задача (1-5) была решена методом конечных разностей при безразмерном шаге элементарной ячейки $\Delta \sim 0,01$. Диапазон варьирования относительных размеров печи в соответствии с результатами [1] составил для высоты $H_a / D_3 = 0,5-5$ и диаметра активной зоны, $D_a / D_3 = 1,4-2,3$. Относительная высота подэлектродного участка $H_{\text{пз}} / D_3$ изменялась в интервале 0,25-2. По итогам решения потенциальной задачи (1-5) определялась величина условного тока между узлами расчетной сетки и мощность источников джоулевой теплоты для каждого элементарного объема в окрестностях узловых точек при удельном электрическом сопротивлении (УЭС) среды – 1 Ом•м.

Полученные результаты и их анализ

Обобщенные результаты для мощности подэлектродного участка по отношению к полной мощности печи $Q_{\text{пз}} / Q_5$ представлены на рис. 3, 4. Как видно, в исследованном диапазоне степень влияния высоты $H_{\text{пз}} / D_3$ на относительную мощность $Q_{\text{пз}} / Q_5$ подэлектродного участка во многом зависит от размеров активной зоны печи и электрода. В отдельных сочетаниях $H_{\text{пз}} / D_3$ и D_a / D_3 возможно повышение $Q_{\text{пз}} / Q_5$ до 50 %. Увеличение расстояния от электрода до решетки не решает проблему ограничения мощности. При $H_{\text{пз}} / D_3 > 1$ изменение $Q_{\text{пз}} / Q_5$ не превышает 1 %. Таким образом, выполнение условия $H_{\text{пз}} / D_3 > 1$ можно рекомендовать при выборе высоты подэлектродного участка.

Основным фактором, определяющим распределение тепловыделений между характерными зонами печи, является соотношение высо-

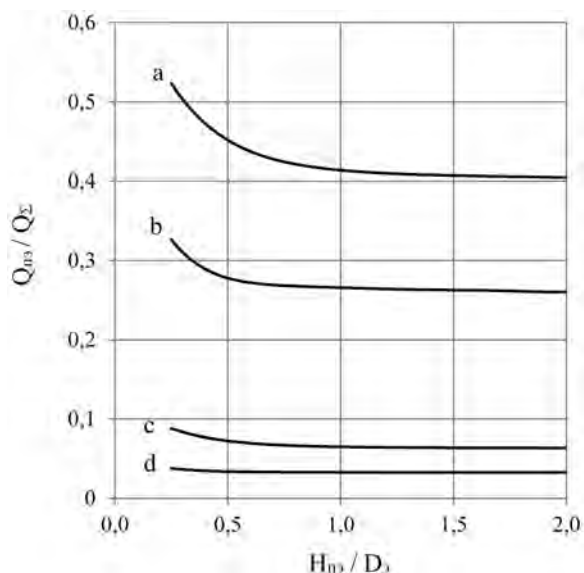


Рис. 3. Влияние безразмерной высоты на относительные тепловыделения в подэлектродном участке при $D_m / D_3 > 1,0$:

a - $H_a / D_3 = 0,5$; $D_a / D_3 = 2,3$; b - $H_a / D_3 = 0,5$; $D_a / D_3 = 1,4$; c - $H_a / D_3 = 5,0$; $D_a / D_3 = 2,3$; d - $H_a / D_3 = 5,0$; $D_a / D_3 = 1,4$

ты активной зоны и диаметра электрода H_a / D_3 (рис. 4). При значениях $H_a / D_3 \geq 2$ вклад подэлектродного участка в общую мощность печи не превышает 15 %. Для печей с развитой высотой $H_a / D_3 \rightarrow 5$ доля джоулевой теплоты под электродом составляет 3,3-8,8 %. Такая взаимосвязь обусловлена развитой боковой поверхностью центрального электрода и футеровки, что приводит к снижению электрического сопротивления активной зоны.

Аналогичным образом проявляется влияние относительного внутреннего диаметра печи D_a / D_3 (рис. 4), увеличение которого в диапазоне 1,4-2,3 сопровождается ростом радиального сопротивления межэлектродного промежутка, соответственно большей величиной тока и мощностью под электродом. Однако по сравнению с высотой активной зоны этот фактор менее значимый.

Выводы

Таким образом, по результатам численного моделирования потенциальной задачи растекания электрического тока в рабочем пространстве электротермических печей кипящего слоя с учетом влияния подэлектродного участка в диапазоне размеров высоты активной зоны $H_a / D_3 = 0,5-5$, диаметра активной зоны $D_a / D_3 = 1,4-2,3$, высоты подэлектродного участка $H_m / D_3 = 0,25-2$ установлено, что основным фактором, определяющим распределение мощности между зонами печи, является высота активной зоны. При значениях $H_a / D_3 \geq 2$ вклад

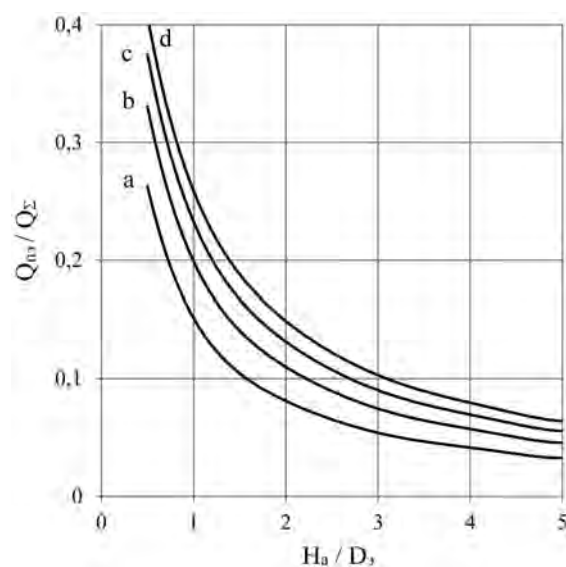


Рис. 4. Влияние безразмерной высоты активной зоны на относительную мощность подэлектродного участка при $D_m / D_3 > 1,0$:

a - $D_a / D_3 = 1,4$; b - $D_a / D_3 = 1,7$; c - $D_a / D_3 = 2,0$; d - $D_a / D_3 = 2,3$

подэлектродного участка в общую мощность печи не превышает 15 %. Увеличение высоты подэлектродного участка в пределах $H_m / D_3 > 1$ не оказывает влияния на его относительную тепловую мощность.

Библиографический список

1. 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.
2. Fluid bed technology in materials processing / С. К. Gupta, D. Sathiyamoorthy. - Boca Raton, Fla.: CRC Press, 1999. - 528 p.
3. Бородуля В. А. Высокотемпературные процессы в электротермическом кипящем слое. - Минск: Наука и техника, 1973. - 173 с.
4. Электросопротивление кипящего слоя графитовых частиц / А. П. Кожан, К. Е. Махорин, С. П. Гориславец // *ИФЖ.* - 1968. - Т. 15. - № 4. - С. 648-652
5. 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. Gubynskyi, Igor V. Barsukov та інш. Режим доступу до матеріалів: <https://www.bnl.gov/isd/documents/86110.pdf>.

Поступила 26.05.2015