

УДК 661.666:66.096.5

Федоров С. С. /к. т. н./,

Губинский М. В. /д. т. н./,

Форись С. Н. /к. т. н./

«НМетАУ»

## Выбор размеров рабочего пространства электротермических печей кипящего слоя для переработки углеродных материалов

На основе уравнений теплового и материального баланса предложена методика определения размеров активной зоны нагрева при проектировании высокотемпературных электротермических печей кипящего слоя для переработки углеродных материалов. Исследована взаимосвязь конструктивных и режимных параметров работы данных агрегатов. Разработаны рекомендации по выбору напряжения на электродах, при котором расчетные размеры печи обеспечивают стабильный электротермический, тепловой и гидравлический режимы работы. Ил. 4. Табл. 2. Библиогр.: 8 назв.

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

*Method of determining the size of the active heating zone during designing of high-temperature electrothermic furnace of boiling bed for processing of carbon materials was suggested on the base of equations of heat and material balance. Interrelation of constructive and regime parameters of these units is investigated.*

*The recommendations concerning the choice of the electrode voltage, under which the estimated sizes of the furnace provide the stable electrothermal, heat and hydraulic modes, are developed.*

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

Итоги последних десятилетий демонстрируют прямую зависимость потребления углеродных материалов от уровня развития мировой экономики и наукоемких технологий. Особым спросом в металлургии, энергетике, приборо- и машиностроении пользуется высокочистый графит, изделия из которого во многом определяют качество конечной продукции. Поэтому все большее внимание со стороны ведущих производителей уделяется улучшению физических свойств графита, совершенствованию технологии его производства, а также расширению сырьевой базы за счет углеродсодержащих отходов.

Основными критериями при выборе агрегатов для производства графита являются технологичность, экологическая безопасность и энергетическая эффективность, которым в полной мере отвечают высокотемпературные электротермические печи кипящего слоя (ЭТПКС, рис. 1) [1-2]. Такие печи обеспечивают поточный процесс очистки и графитизации углеродных материалов при температуре 2000-3000 °С в промышленных объемах.

Рабочее пространство ЭТПКС (рис. 1) футеровано графитовыми блоками 1 и имеет три характерные зоны: активную зону электротермического нагрева 3, участок под электродом 4 для выдержки готового продукта и надслоевое пространство 5, ограничивающее динамический унос мелких фракций материала. Центральный графитовый электрод 2 служит для подвода электрической энергии.

© Федоров С. С. /к. т. н./, Губинский М. В. /д. т. н./, Форись С. Н. /к. т. н./, 2014 г.

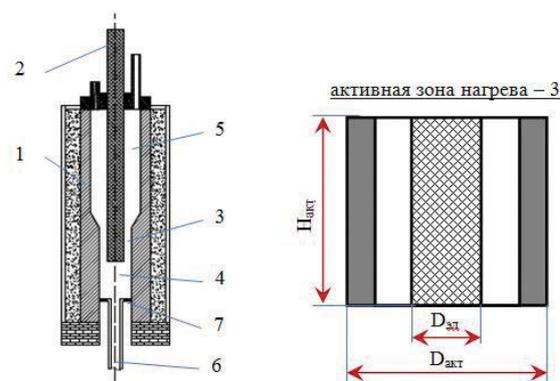


Рис. 1. Принципиальная схема электротермической печи кипящего слоя: 1 - футеровка; 2 - центральный электрод; 3 - активная зона нагрева; 4 - подэлектродное пространство; 5 - надслоевое пространство; 6 - канал готового продукта; 7 - распределительная решетка

Предварительно измельченный и прокаленный, углеродный материал подается в верхнюю часть печи. В активной зоне происходит выделение джоулевой теплоты в объеме кипящего слоя и на поверхности электродов, интенсивное перемешивание и выравнивание температуры материала. Псевдоожигающий агент, азот, поступает из-под распределительной решетки 7. Устойчивые электротермический, тепловой и гидродинамический режимы работы ЭТПКС обеспечиваются выбором конструкции рабочего пространства печи. Поэтому вопрос расчета внутренней геометрии подобных агрегатов заслуживает особого внимания.

В общем случае проектирование ЭТПКС включает: оценку мощности и рабочего тока; расчет

диаметра электрода, высоты и диаметра активной зоны; расчет высоты надслоевого пространства и участка под электродом; расчет теплового баланса печи; уточнение мощности, тока и конструкции печи.

**Целью** данной работы явилась разработка рекомендаций касающихся выбора размеров активной зоны печи (рис. 1). Исходными данными при этом являются производительность по готовому продукту  $G$ , т/ч; рабочая температура  $t_m$ , °С; продолжительность обработки углеродного материала  $t$ , мин; напряжение на электродах  $U_n$ , В; удельное электрическое сопротивление ( $УЭС$ ) электротермического кипящего слоя  $W$ , Ом·м.

Производительность ЭТПКС зависит от назначения печи и для промышленных агрегатов составляет 0,5-2 т/ч. Температурой и длительностью обработки задаются, исходя из требований к степени очистки и графитизации готового продукта [3], а также стохастических особенностей пребывания материала в кипящем слое при поточной работе печи [4].

Получение высокочистых углеродных материалов связано с удалением таких компонентов как летучие, сера и тугоплавкие соединения (TiC, Fe<sub>3</sub>C, VC) при температуре более 2000 °С. Поэтому основным параметром, определяющим степень очистки графитированных материалов, является температура обработки. Для уточнения значения этой температуры нами было выполнено моделирование химического равновесия многокомпонентных систем с учетом их состава и агрегатного состояния при заданных термодинамических параметрах: температуре  $t = 2000-3000$  °С и давлении  $p = 0,1$  МПа [5]. Такой подход оправдан при высоком уровне концентрации энергии в замкнутых объемах, когда велики скорости протекания реакций, приводящие систему в состояние локального равновесия. Условием равновесия при этом является максимум энтропии системы:  $dS = 0$  и  $d^2S < 0$ . В качестве исследуемых материалов рассмотрены антрацит, природный графит марки ГАК-2, нефтяной кокс и термоантрацит. Согласно полученным результатам, благоприятные условия для полного удаления тугоплавких примесей в атмосфере азота достигаются при температурах более 2800 °С (табл. 1).

**Таблица 1.** Температура удаления тугоплавких примесей при переработке углеродных материалов

Параметр	Сырье		
	Антрацит, термоантрацит	Природный графит ГАК-2	Нефтяной кокс
Тугоплавкий компонент	TiC	Fe <sub>3</sub> C	VC
Температура плавления, °С	3160	1600	2770-2830
Температура удаления, °С	> 2800	> 2400	> 2800

Неоднозначным является выбор напряжения на электродах  $U_n$ , так как от него зависят не только размеры активной зоны, но также расход инертного газа и гидравлическое сопротивление кипящего слоя. При этом следует ориентироваться на допустимые токовые нагрузки короткой сети, характеристики и технические возможности источников питания.

Ключевым параметром в работе ЭТПКС является величина  $УЭС$ , зависящая от режима псевдоожижения, состава печной атмосферы, глубины обработки материала, температуры и размера частиц [2, 6]. Общая тенденция такова, что наилучшему качеству графитированного продукта соответствует наименьшее сопротивление. По нашему мнению, целесообразно задавать  $УЭС$  ориентируясь на показатели для чистого графита [7].

С учетом выше изложенного, предварительный расчет мощности  $N$  и номинального тока  $I_n$  выполняется на основе выражений (1-2):

$$N = \frac{G \cdot c_m \cdot t_m}{3,6 \cdot \eta}, \text{ Вт}; \quad (1)$$

$$I_n = \frac{N}{U_n}, \text{ А} \quad (2)$$

где  $c_m$  – кажущаяся теплоемкость материала в интервале температур от 0 °С до  $t_m$ , Дж/(кг·К)

$\eta = 0,8 \div 0,9$  – принятый в первом приближении коэффициент полезного действия печи.

Диаметр электрода определяется по допустимой плотности тока:

$$\frac{4 \cdot I_{ном}}{\pi \cdot D_{эл}^2} \cdot 10^{-4} \leq i_{доп}, \text{ А/см}^2 \quad (3)$$

откуда

$$D_{эл} \geq 0,01 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot I_{ном}}{\pi \cdot i_{доп}}} = 0,01 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot N}{\pi \cdot i_{доп} \cdot U_n}}, \text{ м} \quad (4)$$

где  $i_{доп}$  – допустимая плотность тока для электрода, А/см<sup>2</sup>;  $D_{эл}$  – диаметр электрода согласно номенклатурному ряду, м.

В свою очередь, высота  $H_{акт}$  и диаметр  $D_{акт}$  активной зоны должны удовлетворять условиям длительности обработки материала (5) и тепловой мощности печи (6):

$$V = \frac{E}{\rho \cdot (1 - \epsilon_{mf}) \cdot (1 - \delta)} = \frac{\pi \cdot ((D_{эл} + 2 \cdot b)^2 - D_{эл}^2)}{4} \cdot H_{акт} \cdot \text{м}^3 \quad (5)$$

$$N_{ном} = I_{ном}^2 \cdot R = I_{ном}^2 \cdot \frac{\Omega}{2 \cdot \pi \cdot H_{акт}} \cdot \ln \frac{D_{эл} + 2 \cdot b}{D_{эл}}, \text{ Вт} \quad (6)$$

где  $V$  – минимальный объем активной зоны, соответствующей среднему времени обработки материала, м<sup>3</sup>;  $E = G \cdot V60$  – емкость активной зоны, кг;  $b = 0,5 \cdot (D_{акт} - D_{эл})$  – величина зазора между электродом и футеровкой, м;  $\rho$  – истинная плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\epsilon_{mf}$  – критическая порозность слоя при переходе порогаустойчивости;  $\delta$  – объемная доля газовых пузырей в неоднородном кипящем слое;  $R$  – электрическое сопротивление кипящего слоя, Ом.

На рис. 2 представлена графическая интерпретация решения системы уравнений (5-6) относительно высоты  $H_{акт}$  и величины зазора  $b$  – это точка пересечения кривых  $H_{акт} = f(b, V = const)$  и  $H_{акт} = f(b, N_{ном} = const)$ . Ограничением для выбора высоты рабочей зоны  $H_{акт}$  является допустимое значение плотности тока на боковой поверхности центрального электрода, то есть необходимо выполнение следующего условия:

$$\frac{I_{ном}}{\pi \cdot D_{эл} \cdot H_{акт}} \cdot 10^{-4} \leq i_{доп}, \quad (7)$$

откуда с учетом (4):

$$\frac{H_{акт}}{D_{эл}} \geq 0,25. \quad (8)$$

В качестве примера в табл. 2 представлены результаты расчета основных показателей ЭТПКС производительностью  $G = 1$  т/ч для следующих условий:  $t_M = 2700$  °С  $\tau = 15$  мин;  $\eta = 0,85$ ;  $U_H = 110$  В;  $W = 0,05$  Ом · м (рис. 2).

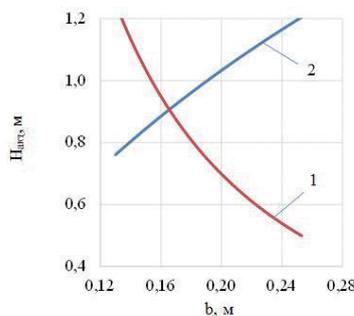


Рис. 2. Определение высоты активной зоны и зазора между электродами ЭТПКС ( $G = 1$  т/ч;  $t_M = 2700$  °С  $\tau = 15$  мин;  $\eta = 0,85$ ;  $U_H = 110$  В;  $W = 0,05$  Ом · м): 1 –  $H_{акт} = f(b, V = const)$  из уравнения (5); 2 –  $H_{акт} = f(b, N_{ном} = const)$  из уравнения (6)

Таблица 2. Результаты расчета ЭТПКС по данным рис. 2

Параметр	Значение
Объем активной зоны $V, м^3$	0,22
Номинальная мощность $N, МВт$	1,85
Номинальный рабочий ток $I_H, кА$	16,8
Диаметр электрода $D_{эл}, м$	0,29
Диаметр активной зоны $D_{акт}, м$	0,62
Расчетная высота активной зоны $H_{акт}$	0,92

С использованием предложенной методики (1-8) была исследована зависимость конструкции активной зоны в диапазоне параметров характерных для реальных ЭТПКС:  $U_{ном} = 20-220$  В,  $W = 0,01-0,17$  Ом · м,  $i_{доп} = 5-25$  А/см<sup>2</sup>,  $E = 5-500$  кг и безразмерного отношения диаметра электрода к объему зоны  $D_{эл} / V^{1/3} = 0,4-0,9$ .

Перечисленные параметры косвенно определяют производительность  $G$ , длительность обработки  $t$ , рабочую температуру  $\tau_M$  и мощность печи  $N$ . При этом на основе  $\pi$ -теоремы относительные размеры печи, высота  $H_{акт} / D_{эл}$  и диаметр  $D_{акт} / D_{эл}$  активной зоны, являются функциями вида:

$$\frac{H_{акт}}{D_{эл}} = f_1(P_1, P_2), \quad \frac{D_{акт}}{D_{эл}} = f_2(P_1, P_2), \quad (8)$$

где  $P_1 = \frac{N \cdot \Omega}{U^2 \cdot V^{1/3}}$  – безразмерная мощность печи,

$$P_2 = \frac{D_{эл}}{V^{1/3}} \text{ – безразмерный диаметр электрода.}$$

Полученные результаты обобщены в номограмме (рис. 3) для широкого интервала безразмерной мощности печей  $P_1 = 5-35$ . С ростом последней относительный диаметр активной зоны  $D_{акт} / D_{эл}$  уменьшается, а высота, напротив, увеличивается  $H_{акт} / D_{эл}$ . Увеличение диаметра электрода, при прочих равных условиях, приводит к снижению относительных размеров печи.

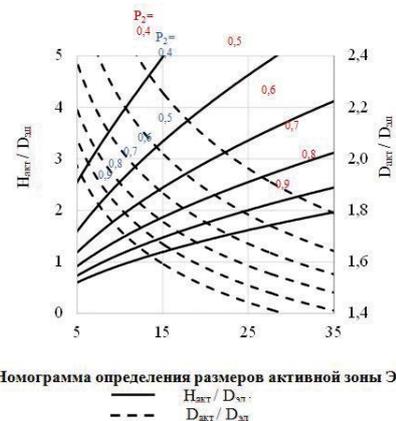


Рис. 3. Номограмма определения размеров активной зоны ЭТПКС:  
—  $H_{акт} / D_{эл}$   
- - -  $D_{акт} / D_{эл}$

Электрические параметры ЭТПКС динамически изменяются во времени и во многом зависят от структуры кипящего слоя. Неблагоприятным является поршневой режим псевдооживления, характеризующийся частыми разрывами электрической цепи при прохождении газовых пробок и соответственно наибольшей амплитудой колебания мощности. В то же время более «стабильный» пузырьковый режим для графита существует в сравнительно узком диапазоне чисел псевдооживления [1-2].

Одно из возможных решений проблемы выравнивания хода печи – выбор геометрии рабочего пространства печи на основе известных свойств псевдооживленных систем. Условием отсутствия образования пробок [8] является соотношение, которое может быть рекомендовано при проектировании печи:

$$H_{акт} / D_{экв} \leq 1, \quad (9)$$

где  $D_{экв} = (D_{акт}^2 - D_{эл}^2) / (D_{акт} + D_{эл}) = D_{акт} - D_{эл} = 2 \cdot b$  – эквивалентный диаметр активной зоны, м.

Преобразование номограммы (рис. 3) позволило выразить связь гидродинамического соотношения размеров активной зоны с электрическими параметрами ЭТПКС (рис. 4).

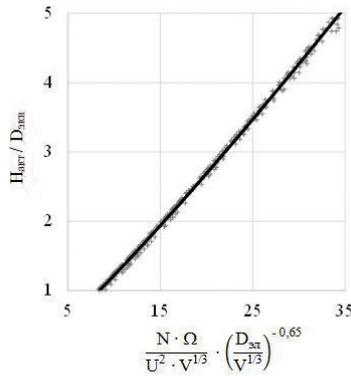


Рис. 4. Зависимость соотношения высоты и эквивалентного диаметра активной зоны от параметров ЭТПКС

При этом соотношение высоты и эквивалентного диаметра кипящего слоя  $H_{\text{акт}} / D_{\text{экр}}$  хорошо описывается регрессионной моделью (10) с коэффициентом корреляции  $R^2 > 0,99$ :

$$\frac{H_{\text{акт}}}{D_{\text{экр}}} = 0,088 \cdot \left[ \frac{N \cdot \Omega}{U^2 \cdot V^{1/3}} \cdot \left( \frac{D_{\text{эл}}}{V^{1/3}} \right)^{-0,65} \right]^{1,14} \quad (9)$$

Выражение (9) позволяет напрямую выполнять оценки взаимосвязи гидродинамических, тепловых и электрических параметров ЭТПКС.

Возможен также иной подход, когда необходимо для заданного гидродинамического соотношения  $H_{\text{акт}} / D_{\text{экр}}$  определить напряжение источника. Путем совместного решения уравнений (4) и (9) получено следующее выражение:

$$U = 1,6 \cdot N^{0,4} \cdot \Omega^{0,6} \cdot V^{-0,07} \cdot i_{\text{доп}}^{0,2} \cdot \left( \frac{H_{\text{акт}}}{D_{\text{экр}}} \right)^{-0,5} \quad (10)$$

Таким образом, основными параметрами при выборе напряжения выступают мощность, УЭС слоя и соотношение размеров активной зоны. Допустимая плотность тока электрода и объем рабочего пространства оказывают слабое влияние.

**Выводы**

На основе уравнений материального и теплового баланса разработана методика расчета размеров рабочего пространства электротермических печей кипящего слоя (ЭТПКС), которая позволяет определять высоту  $H_{\text{акт}}$  и диаметр  $D_{\text{акт}}$  активной зоны нагрева при заданных значениях производительности, длительности обработки, напряжения на электродах, удельного электрического сопротивления кипящего слоя и рабочей температуры.

С использованием р-теоремы показано, что относительная высота и относительный диаметр активной зоны ЭТПКС являются функциями безразмерных мощности печи  $P_1 = N \cdot \Omega / (U^2 \cdot V^{1/3})$  и диаметра электрода  $P_2 = D_{\text{эл}} / V^{1/3}$ . Проведены параметрические исследования изменения размеров активной зоны печи в диапазоне: напряжения на

электродах 20-220 В, УЭС кипящего слоя 0,01-0,17 Ом·м, емкости печи 5-500 кг, допустимой плотности тока 5-25 А/см<sup>2</sup> и безразмерного диаметра электрода  $P_2 = 0,4-0,9$ . На основании полученных результатов построена номограмма для определения размеров ЭТПКС.

Получено выражение, устанавливающее связь между гидравлическими и электротермическими параметрами работы ЭТПКС, как функции соотношения высоты  $H_{\text{акт}}$  и эквивалентного диаметра  $D_{\text{экр}}$  активной зоны от безразмерных мощности печи  $P_1$  и диаметра электрода  $P_2$ . На основе полученной зависимости предложены рекомендации по выбору напряжения на электродах ЭТПКС, при котором расчетные размеры активной зоны обеспечивают стабильную работу ЭТПКС без образования газовых поршней.

**Библиографический список**

1. Печи для производства высокочистых 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 конференции «Теория и практика тепловых процессов в металлургии» 18-21 сентября 2012, Екатеринбург УрФУ, - С. 79-83.
2. Fedorov S. S., Barsukov I. V., Gubynskiy M. V., Livitan M. V., Gogotsi O. G., UpendraRohatgi. Modeling the Operation Regimes in Ultra-high Temperature Continuous Reactors / Proceedings of the 4<sup>th</sup> Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting FEDSM2014-22161, 2014. URL: <http://www.asmeconferences.org/FEDSM2014/ViewAcceptedAbstracts.cfm> (дата обращения: 20.05.2014)
3. Федосеев С. Д. Теория технологических процессов. Углерод. М.: Моск. хим. технол. ин-т им. Д. И. Менделеева, 1979. - 48 с.
4. Гельперин Н. И., Айнштейн В. Г., Кваша В. Б. Основы техники псевдоожижения. - Москва: Химия, 1967. - 664 с.
5. Трусов Б. Г. Программная система моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. - 2012. - Спец. вып. 2 : Программная инженерия. - С. 240-249.
6. Анализ влияния газовых пузырей на проводимость электротермического кипящего слоя / С. С. Федоров, М. В. Губинский, С. Н. Форись // Сборник докладов международной научно-практической конференции «Творческое наследие В. Е. Грум-Гржимайло» 27-29 марта 2014, Екатеринбург УрФУ, - С. 377-383.
7. Бородуля В. А. Высокотемпературные процессы в электротермическом кипящем слое. - Минск: Наука и техника, 1973. - 173 с.
8. Дэвидсон И., Харрисон Д. Псевдоожижение. Пер. с англ. / под ред. Н.И. Гельперина. - М.: Химия, 1974. - 728 с.

Поступила 22.04.2014