

Выводы

Разработанный алгоритм исследования температурного поля в рабочей камере печи основанный на экспериментальных исследованиях температуры рабочего пространства печи в промышленных условиях позволил оптимизировать расположение горелок и окон для отвода продуктов горения. При этом

Таблица 2. Сравнительный анализ расхода газа на печь

	Марка стали						
	P18	40Г	X12M	15X	ШХ15	30ХГТ	60С2
$V_{тб}, M^3 / ч$	61,4	47,1	52,3	50,2	56,8	59,7	49,4
$V_{тн1}, M^3 / ч$	57,3	43,6	47,2	46,8	52,1	54,8	46,8
$V_{тн2}, M^3 / ч$	55,4	42,5	46,4	45,3	51,6	53,2	45,6
Снижение расхода топлива от $V_{тн1}$ и $V_{тн2}$, %	6,7/9,7	7,4/9,8	9,8/11,3	6,8/9,8	8,3/9,2	8,2/10,9	5,3/7,7

расчетное снижение расхода топлива, достигнутое за счет интенсификации теплообмена между газом и металлом, составило 7,7–11,3 % в зависимости от марки стали нагреваемой заготовки.

Библиографический список

1. Качан Ю.Г., Степкин В.В., Спекторова Ю.Б. Математическая модель камерной нагревательной

печи // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2011. – № 4. – С. 54-61.

2. Качан Ю.Г., Степкин В.В., Лиуш Ю.Б. О повышении энергоэффективности камерных нагревательных печей с выкатным подом путем изменения положения горелочных устройств // Теория и практика металлургии: общегосударственный научно-технический журнал. – 2012. – № 6. – С. 21-27.

3. Качан Ю.Г., Коваленко В.Л., Спекторова Ю.Б. Количественная оценка энергоэффективности камерных печей с выкатным подом // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький. – 2012. – № 3. – С. 66-69.

4. Василькова С.Б., Генкина М.М., Гусовский В.Л. и др. Расчет нагревательных и термических печей: Справ. изд. Под ред. Тымчака В.М. и Гусовского В.Л. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.

5. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Физические величины. Справ. Под ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

Поступила 02.04.2013

УДК 661.666: 66.096.5

Федоров С.С. /к.т.н./

Национальная металлургическая Академия Украины

Наука

Анализ эффективности применения высокотемпературных секционных утилизаторов теплоты с кипящим слоем. Постановка проблемы и разработка методики исследования. Сообщение I

Переработка углеродных материалов в высокотемпературных электротермических печах кипящего слоя характеризуется значительным выходом вторичных энергоресурсов. С целью повышения тепловой эффективности данных агрегатов для нагрева исходного сырья предложены секционные утилизаторы теплоты готового продукта (каскадные аппараты кипящего слоя). Разработана математическая модель таких аппаратов, позволяющая исследовать влияние на их тепловую работу режимных и конструктивных параметров. Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: переработка углеродных материалов, высокотемпературная электротермическая печь, кипящий слой, повышение тепловой эффективности, секционный утилизатор теплоты готового продукта, нагрев сырья, математическое моделирование

The processing of carbon materials in high-temperature thermal-electric furnaces with a fluidized bed is characterized by a significant loss of secondary energy. In order to improve the thermal efficiency of these units, the final product sectional heat exchangers (cascading fluidized bed apparatuses) for raw materials heating are proposed. The mathematical model of these apparatuses, which allows researching the effect of their operational and design parameters on the thermal performance, was created.

Keywords: processing of carbon materials, high-temperature thermal-electric furnace, fluidized bed, improvement of thermal efficiency, sectional heat exchanger of final product heat, heating of raw materials, mathematical simulation

Динамичный рост мирового рынка углеродных материалов [1] обусловлен высокой химической стойкостью, температуро- и электропроводностью изделий на их основе. Область применения углерода

© Федоров С.С., 2013 г.

охватывает широкий промышленный сектор: металлургию, машиностроение и энергетику. Углеродные материалы используют для изготовления плавильных тиглей, волокнистых огнеупоров, электродов, аккумуляторных батарей, электрооборудования, теплообменников, замедлителей нейтронов, и целого ряда прочих изделий [1-3].

Высокая потребность в углеродном сырье опреде-

Таблица. Тепловой баланс электротермической печи кипящего слоя ($t_{\text{раб}} = 2700 \text{ }^\circ\text{C}$)

Приходные статьи			Расходные статьи		
Наименование	кВт	%	Наименование	кВт	%
Физическая теплота сырья	12	0,7	Физическая теплота готового продукта	1562	90,5
Физическая теплота азота	0	0,0	Физическая теплота уходящих газов	7	0,4
Затраты электроэнергии	1715	99,3	Физическая теплота уноса	78	4,5
-	-	-	Водяное охлаждение элементов печи	80	4,6
ИТОГО	1727	100,0	-	1727	100,0

ляет значительные объемы технологических углеродсодержащих отходов, проблема утилизации которых становится все более актуальной. Таким образом, вопросы получения и переработки углеродного сырья без преувеличения имеют огромное практическое и стратегическое значение для черной и цветной метал-

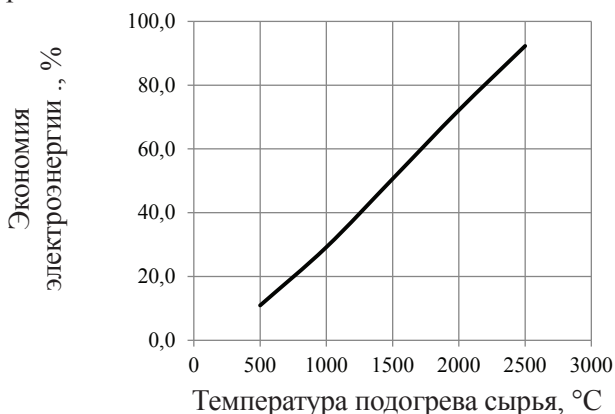


Рис. 1. Экономия электроэнергии в электротермической печи при подогреве сырья

лургии.

При производстве углеродных материалов решается комплексная задача удаления химических примесей, формирования требуемой кристаллической структуры и заданного гранулометрического состава сырья [2, 3]. Выбор технологии при этом определяется требованиями к качеству конечного изделия. Особое значение в технологическом процессе имеет температура обработки углеродных материалов. При этом можно выделить 4-ре характерные стадии: пиролиз (400-500 °C), карбонизацию (до 1500 °C), предкристаллизационную стадию (1500-1900 °C) и графитизацию (1900-3000 °C) [2].

Температуры графитизации достигаются в электротермических печах, принцип действия которых основан на пропускании электрического тока между двумя графитовыми электродами через слой электропроводного углеродсодержащего материала [3-6]. Слой материала в зависимости от фракционного состава может быть псевдоожиженным или же плотным.

Практический интерес представляет исследование и совершенствование технологии обработки углеродного сырья в электрокальцинаторах при температурах 2000-3000 °C с кипящим в атмосфере азота слоем частиц размером 0,1-2,0 мм [5, 6]. При этом развитая поверхность дисперсного материала и его интенсивное перемешивание позволяют получать однородный чистый продукт с высокой степенью графитизации.

Одной из основных проблем электротермического производства является высокая энергоемкость углеродной продукции – 500-1600 кВт.ч/т [3, 6], которая связана, главным образом, со значительным выходом вторичных энергоресурсов: физической теплоты готового продукта, теплоты системы водяного охлаждения элементов печи, физической и химической теплоты отходящих газов (таблица).

Химическая теплота отходящих газов определяется свойствами исходного сырья и обусловлена содержанием в них водорода, окиси углерода, серы и углеродсодержащей пыли (уноса). Эти газы дожигаются в котлах-утилизаторах. Выполненная оценка для электрокальцинатора кипящего слоя [6] с рабочей температурой $t_{\text{раб}} = 2700 \text{ }^\circ\text{C}$ показала, что располагаемая теплота дожигания отходящих газов составляет порядка 400 кВт, то есть около 23 % от потребляемой

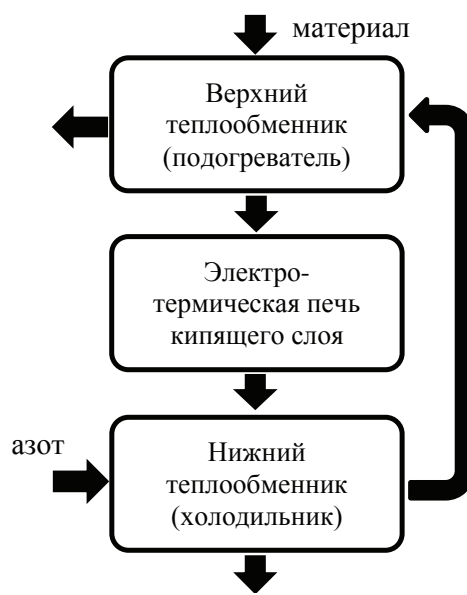


Рис. 2. Замкнутая технологическая схема использования теплоты готового продукта

электрической мощности печи.

Что касается физической теплоты готового продукта (таблица), то практически весь этот потенциал отбирается в специальных водяных холодильниках

поверхностного типа. Поскольку при таких тепловых нагрузках элементов оборудования на первом месте стоят вопросы надежности, температура воды в системе охлаждения не превышает 40 °С с последующим сбросом низкопотенциальной теплоты на градирне. В этой связи, очевидной является целесообразность использования теплового потенциала готового продукта по замкнутой технологической схеме для нагрева исходного сырья [7], что дает прямую экономию электроэнергии пропорционально снижению теплового дефицита материала (рис. 1).

Применительно к электротермическим печам кипящего слоя организация такой схемы утилизации теплоты возможна на основе контактных теплообменников – аппаратов кипящего слоя с промежуточным инертным теплоносителем в виде азота. Принципиальная схема такой системы утилизации представлена на рис. 2. Наличие современных генераторов азота производительностью до 5000 м³/ч позволяет решить подобную задачу при относительно небольших капитальных и эксплуатационных затратах, связанных с использованием промежуточного инертного теплоносителя.

Как известно, эффективный теплообмен обеспечивает противоточное движение теплоносителей. Недостатком применения аппаратов кипящего слоя в качестве утилизаторов теплоты является работа по принципу «идеального прямотока», когда температуры теплоносителей на выходе равны [8, 9].

В результате интенсивного перемешивания в объеме камеры устанавливается одинаковая температура материала, а изменяется только лишь температура газов по направлению их движения. При чем, вследствие развитой поверхности дисперсных частиц 1000-24000 м²/м³, это изменение наблюдается на некотором начальном участке восхождения газового потока [8, 9].

Противоточная схема движения в аппаратах кипящего слоя обеспечивается на основе так называемых секционных каскадных схем (рис. 3), когда материал проходит последовательно несколько температурных камер [8, 9]. Переход из одной камеры в другую осуществляется через специальные переливные патрубки, поскольку кипящий слой ведет себя аналогично жидкой среде. С увеличением числа секций такого секционного теплообменника схема приближается к классическому противотоку.

С целью определения эффективности секционных утилизаторов теплоты применительно к электротермической печи кипящего слоя [6] были проведены расчетно-теоретические исследования влияния на их тепловую работу гранулометрического состава материала, рабочих температур, числа секций, тепловых потерь через футеровку и отношения расходных теплоемкостей теплоносителей.

Разработанная квазистатическая математическая модель тепловых и гидродинамических процессов в секционном утилизаторе включала в себя:

- уравнение теплового баланса:

$$G \cdot c_M \cdot dt_M + V \cdot c_T \cdot dt_T + dQ_{\text{н.о.}} = 0, \quad (1)$$

где G – расход материала, кг/с; V – расход азота нм³/с; $dQ_{\text{н.о.}}$ – тепловые потери от наружного охлаждения корпуса теплообменника; c_M – средняя теплоемкость материала в заданном интервале температур, Дж/(кг·°С); c_T – средняя теплоемкость в заданном интервале температур, Дж/(м³·°С);

- уравнение теплоотдачи:

$$Q_{M-T} = \alpha \cdot (t_M - t_T) \cdot F_{\text{сд}}, \quad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи между газом и материалом на основе уравнения подобия $Nu = 0,01 \cdot Re / \varepsilon \cdot Pr^{0,33}$ [8], Вт/(м·К); t_M , t_T – температуры материала и газа, °С; $F_{\text{сд}}$ – площадь теплообменной поверхности слоя, м²; ε – порозность слоя;

- зависимости для расчета действительной w_d , первой критической скорости начала псевдооживления $w_{\text{кр1}}$ и второй критической скорости начала уноса материала $w_{\text{кр2}}$ [8]

$$w_d = w_0 \cdot \frac{(t_T + 273)}{t_T}, \text{ м/с}; \quad (3)$$

$$w_{\text{кр1}} = \frac{Ar}{1400 + 5,22 \cdot Ar^{0,5}} \cdot \frac{v}{d_{\text{ч}}}, \text{ м/с}; \quad (4)$$

$$w_{\text{кр2}} = \frac{Ar}{18 + 0,6 \cdot Ar^{0,5}} \cdot \frac{v}{d_{\text{ч}}}, \text{ м/с}; \quad (5)$$

где w_0 – скорость азота на пустое сечение секции, приведенная к нормальным условиям, м/с; $d_{\text{ч}}$ – размер частиц материала, м; v – кинематический коэф-

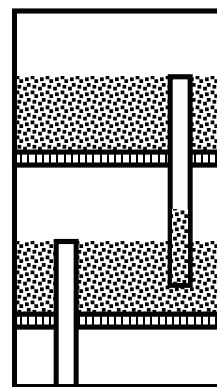


Рис. 3. Схема одной ступени секционного аппарата

фициент вязкости азота при соответствующей температуре потока, м²/с;

- зависимость для определения средней порозности слоя

$$\varepsilon = \frac{(18 \cdot Re + 0,36 \cdot Re^2)^{0,21}}{Ar}. \quad (6)$$

Кроме этого учитывались потери теплоты теплопроводностью через стенки теплообменника.

В качестве условий однозначности были выбра-

ны: заданная температура обработки материала в электротермической печи кипящего слоя $t_{\text{раб}} = 2000\text{--}2700\text{ }^{\circ}\text{C}$, соответствующая температуре готового продукта на входе в холодильник; температура исходного материала на входе в подогреватель $t_{\text{м}0} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; температура азота на входе в холодильник $t_{\text{а}0} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4).

В пределах одной секции температура материала принималась постоянной и равной его температуре на выходе из этой секции. Диаметр секций подбирался таким образом, чтобы обеспечить развитый режим кипения в расчетном интервале температур газа по условию $w_{\text{кр}1} < w_{\text{д}} < w_{\text{кр}2}$. Высота секций – с учетом заполнения объема камеры кипящим слоем.

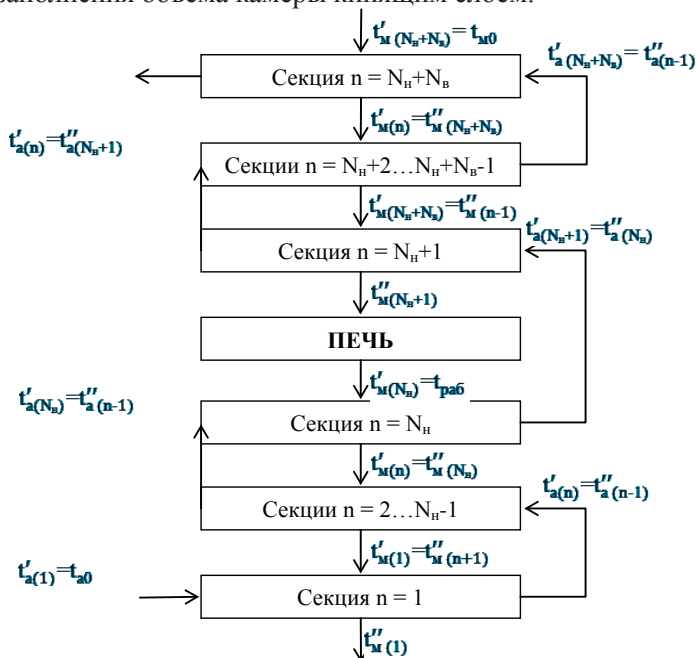


Рис. 4. Расчетная схема теплообмена в секционном утилизаторе

Задача теплообмена для каждой секции решалась методом элементарных тепловых балансов, при этом объем по высоте разбивался с шагом $\Delta h = 1\text{--}10\text{ мм}$, соответствующим порядку размера частиц материала. Взаимное влияние системы секций вычислялось методом итераций по заданным условиям однозначности.

Критерием адекватности модели выступала величина невязки теплового баланса для отдельных узлов, секций и системы в целом, которая не превышала в расчетах 0,1 %.

Выводы

Совершенствование технологий производства углеродным материалов в электротермических печах кипящего слоя путем комплексной утилизации вторичных энергетических ресурсов данного процесса является актуальной практической задачей

Физическая теплота готового продукта может быть использована по замкнутой технологической

схеме на основе секционных каскадных утилизаторов теплоты для снижения теплового дефицита исходного сырья.

Разработана математическая модель тепловых и гидродинамических процессов в высокотемпературных секционных утилизаторах кипящего слоя, позволяющая исследовать влияние на их тепловую работу гранулометрического состава материала, рабочих температур, числа секций, тепловых потерь через футеровку и отношения расходных теплоемкостей теплоносителей.

Библиографический список

1. Industrial minerals: global non-metallic minerals intelligence. URL: [http:// www.indmin.com](http://www.indmin.com). (дата обращения: 21.02.2013).
2. Щурик А.Г. Искусственные углеродные материалы. – Пермь: Пермский государственный университет, 2009. – 342 с.
3. Петров Б.Ф. Энергосбережение при производстве электродного термоантрацита. – К.: Экотехнология, 2006. – 144 с.
4. Бородуля В.А. Высокотемпературные процессы в электротермическом кипящем слое. – Минск: Наука и техника, 1973. – 173 с.
5. EUROPEAN PATENT APPLICATION №87300021.0, Int. Cl.⁴ C01B 31/4, B01J 8/24. Thermal purification of natural mineral carbons / Goldberger W.M., Carney P.R., Reed A.K.; 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.
6. Губинский М.В., Федоров С.С., Ливитан Н.В. и др. Печи для производства высококачественных углеродных материалов / Сб. докл. междунар. науч.–практ. конф. «Теория и практика тепловых процессов в металлургии» 18-21 сентября 2012, Екатеринбург УрФУ. – С. 79-83.
7. Розенгарт Ю.И., Якобсон Б.И., Мурадова З.А. Вторичные энергетические ресурсы черной металлургии и их использование. - К.: Высшая школа, 1988. - 328 с.
8. Тодес О.М., Цитович О.Б. Аппараты с кипящим зернистым слоем. – Ленинград: Химия, 1981. – 296 с.
9. Дементьев В.М. Тепловые расчеты многозонных печей с кипящим слоем. – М.: Металлургия, 1971. – 179 с.

Поступила 01.04.2013