

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Нигматулин Р.И.* Основы механики гетерогенных сред. — М.: Наука, 1978. — 336 с.
2. *Шрайбер А.А., Гавин Л.Б., Наумов В.А., Яценко В.П.* Турбулентные течения газозвеси. — К.: Наукова думка, 1987. — 240 с.
3. *Абрамович Г.Н.* О влиянии примеси твердых частиц или капель на структуру турбулентной газовой струи // Докл. АН СССР. — 1970. — Т. 190, № 5. — С. 1052–1055.
4. *Зув Ю.В., Лепешинский И.А.* Математическая модель двухфазной турбулентной струи // Изв. АН СССР. МЖГ. — 1981. — № 6. — С. 69–77.
5. *Милоевич Д., Солоненко О.П., Крылов Г.М.* Сравнительный анализ некоторых моделей турбулентного переноса инерционных частиц // Процессы переноса в одно- и двухфазных средах. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР. 1986. — С. 70–80.
6. *Кондратьев Л.В.* Модель и численное исследование турбулентного течения газозвеси в трубе. Автореф. дисс. канд. физ.-мат. наук. — Л., 1989. — 18 с.
7. *Деревич И.В., Ерошенко В.М.* Расчет осредненного скоростного скольжения фаз при турбулентном течении дисперсных потоков в каналах // Изв. АН СССР. МЖГ. — 1990. — № 2. — С. 69–78.
8. *Рохман Б.Б.* Об уравнениях переноса корреляционных моментов пульсаций скоростей дисперсной фазы на стабилизированном участке осесимметричного двухфазного потока. Часть I // Пром. теплотехника. — 2005. — Т. 27, № 3. — С. 9–16.
9. *Hanjalic K., Launder B.E.* A Reynolds stress model of turbulence and its application to thin shear flows // J. Fluid. Mech. — 1972. — 52, № 4. — P. 609–638.

*Получено 09.08.2005 г.*

УДК 621.3.035.2:536.5

**ПАНОВ Е.Н.<sup>1</sup>, КУТУЗОВ С.В.<sup>2</sup>, ЛЕЛЕКА С.В.<sup>1</sup>,  
ШИЛОВИЧ И.Л.<sup>1</sup>, БОЖЕНКО М.Ф.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”*  
<sup>2</sup>*Открытое акционерное общество “Украинский графит”*

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ КЕРНА В П-ОБРАЗНЫХ ПЕЧАХ ГРАФИТАЦИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Наведено результати експериментальних досліджень та числових розрахунків температурних полів П-подібних печей графітації постійного струму. Запропоновано емпіричні рівняння для визначення середніх температур заготовок в керні для будь-якого проміжку часу в залежності від теплофізичних властивостей матеріалів, конструктивних розмірів керна та режимних параметрів процесу графітації.

Приведены результаты экспериментальных исследований и численных расчетов температурных полей П-образных печей графитации постоянного тока. Предложены эмпирические уравнения для расчета средних температур заготовок в керне для любого момента времени в зависимости от теплофизических свойств материалов, конструктивных размеров керна и режимных параметров процесса графитации.

Results of the temperature fields experimental investigations and numerical simulation in the П-shaped direct current graphitization kilns are performed. Fitted equations are performed for average temperatures calculation of billets in the kern for arbitrary time depending of thermophysical properties, kern geometry and technologies parameters of the graphitization process.

$b$  – ширина керна;  
 $c$  – удельная массовая теплоемкость элемента печи и заготовок;  
 $d_{\text{экв}} = 4Nb/(H+b)$  – эквивалентный диаметр керна;  
 $Fo = \lambda\tau / c\rho\ell_o^2$  – число Фурье;  
 $H$  – высота керна;  
 $\ell_o$  – определяющий размер;  
 $P_{\tau}$  – количество подведенной электрической энергии;  
 $q_v$  – объемная плотность внутреннего источника теплоты;  
 $t$  – температура элемента печи;  
 $t_{\tau}$  – текущая истинная средняя температура заготовок в кернах;  
 $X(x, y, z)$  – декартовы координаты;

### Введение

Завершающим технологическим переделом при производстве углеграфитовых изделий является процесс графитации, сущность которого состоит в высокотемпературной обработке этих изделий до 2500...3000 °С в специальных графитировочных печах.

При высокотемпературной обработке изделий происходит непрерывное изменение свойств материалов – повышение плотности и теплопроводности; снижение электросопротивления, твердости и содержания зольных примесей; повышение реакционной способности, в частности, окисляемости; улучшение некоторых антифрикционных свойств.

При промышленном производстве графитированных изделий процесс графитации осуществляется в электрических однофазных печах сопротивления по двум технологиям: Ачесона и Кастнера.

По способу Ачесона, применяемого на ОАО “Укрграфит”, нагрев углеродных заготовок осуществляется теплопроводностью и излучением от пересыпки, находящейся в пространстве между заготовками, в нормальных прямых и П-образных печах.

### Постановка задачи

Несмотря на простоту конструкции печей, очевидна сложность задач, связанных с совер-

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  
 $\rho$  – плотность элемента печи и заготовок;  
 $\Theta = t_{\tau}\ell_o\tau\lambda/P_{\tau}$  – безразмерная температура;  
 $\phi$  – время с начала подвода мощности;  
 $\nabla$  – оператор Гамильтона.

#### Нижние индексы:

гр – графитация;  
 экв – эквивалентный;  
 $i$  – текущее значение параметра.  
 $p$  – давление;  
 $\tau$  – время;

#### Сокращения:

ВР – вольфрам-рений;  
 УЭС – удельное электрическое сопротивление;  
 ХА – хромель-алюмель.

шением технологий графитации в них. Здесь при анализе необходимо учитывать то, что электро- и теплофизические свойства всех материалов загрузки существенно и нелинейно зависят от температуры, а осуществление режима ввода электроэнергии в печь зависит от пределов регулирования напряжения и наибольшей величины тока трансформатора. Следует также учесть и то, что сам процесс нагрева является довольно энергоемким и потребляет до 75% всей энергии, затрачиваемой на производство графитированных изделий.

В отечественной и зарубежной литературе достаточно внимания уделено анализу факторов, влияющих на качество графитируемых изделий. Это, например, способы укладки керна [1-3], свойства материалов пересыпки и теплоизоляции [4-7], скорость подъема температуры [8-9] и др. Проанализированы также и способы управления процессом графитации [10-11], наиболее правильным из которых, на наш взгляд, является управление по изменению температуры.

Из литературы, опыта практической работы и проведенных нами экспериментальных исследований известно, что в промышленных условиях практически невозможно выполнить достоверные измерения температур, характеризующих окончание процесса графитации, поэтому управление этим процессом во всем мире в настоящее время ведется только по заранее заданному расходу энергии, т. е. без осуществления обратной связи.

Таким образом, представляется целесообразным и необходимым при определении температурных полей в печах графитации, особенно на завершающей стадии процесса, использование метода математического моделирования, для реализации которого в практических условиях необходимы экспериментальные температурные поля в области возможных достоверных температурных измерений.

### **Методика проведения экспериментальных исследований и полученные результаты**

Экспериментальные исследования температурно-теплового режима были проведены на П-образных печах постоянного тока № 23 (3 кампании), № 25 и № 27 (по 1 кампании).

Измерения температур внутри заготовок производили непосредственно вольфрам-рениевыми и хромель-алюмелевыми термопарами, а на поверхности — оптическим пирометром и косвенно с помощью измерительного графитового блока с установленными на определенных расстояниях вольфрам-рениевыми термопарами.

Для изготовления вольфрам-рениевых термопар использовали проволоку ВР 5/20-3 с диаметром термоэлектродов 0,5 мм. Для электроизоляции термоэлектродов на них одедали двухканальную алундовую соломку, горячий спай термопары сваривали в среде гелия, после чего термопару помещали в муллит-кремнеземистый чехол МКРЦ с температурой допустимого применения до 1800 °С. Внутреннюю полость трубки засыпали порошком нитрида бора, после чего осуществляли ее дегазацию в трубчатой печи при температуре 700 °С. Каждая термопара проверялась на одинаковость показаний по образцовой платиновой термопаре, помещаемой на внешней поверхности ВР термопарного чехла. С целью исключения электрического контакта между керном и измерительной системой, который может возникать из-за наличия электропроводной графитовой пыли, термоэлектроды свободных концов термопар изолировали фторопластовыми и полихлорвиниловыми трубками.

Термоэлектроды хромель-алюмелевых термопар изолировали высокотемпературной кремне-

земистой нитью, нанесенную на них в виде двойной оплетки, рабочий спай сваривали в воздушной среде, после чего термопару помещали в трубку из нержавеющей стали, внутреннюю полость которой засыпали порошком окиси магния. Также как и для ВР термопар свободные концы ХА термопар изолировали фторопластовыми и полихлорвиниловыми трубками. ХА термопары проверяли на одинаковость показаний и соответствие их градуировки табличным значениям по образцовой платиновой термопаре.

В качестве вторичного прибора для измерения температур в режиме реального времени и исключения непосредственного контакта с датчиками температур использовали разработанный в НТУУ “КПИ” измерительный комплекс сбора данных для высокотемпературных технологических процессов [12].

В качестве примера на рис. 1 приведена схема установки термопар в одном из сечений печи №27, а на рис. 3 — экспериментально измеренные температуры внутри заготовок.

Примерное количество экспериментальных данных может быть оценено исходя из того, что в среднем на каждой кампании использовали 32 входа модулей сбора данных с частотой опроса от 1 до 10 мин. При длительности одной кампании 70...80 часов примерное количество опытных данных для всех 5 кампаний составляет от 14 до 16 тыс. экспериментальных значений температуры.

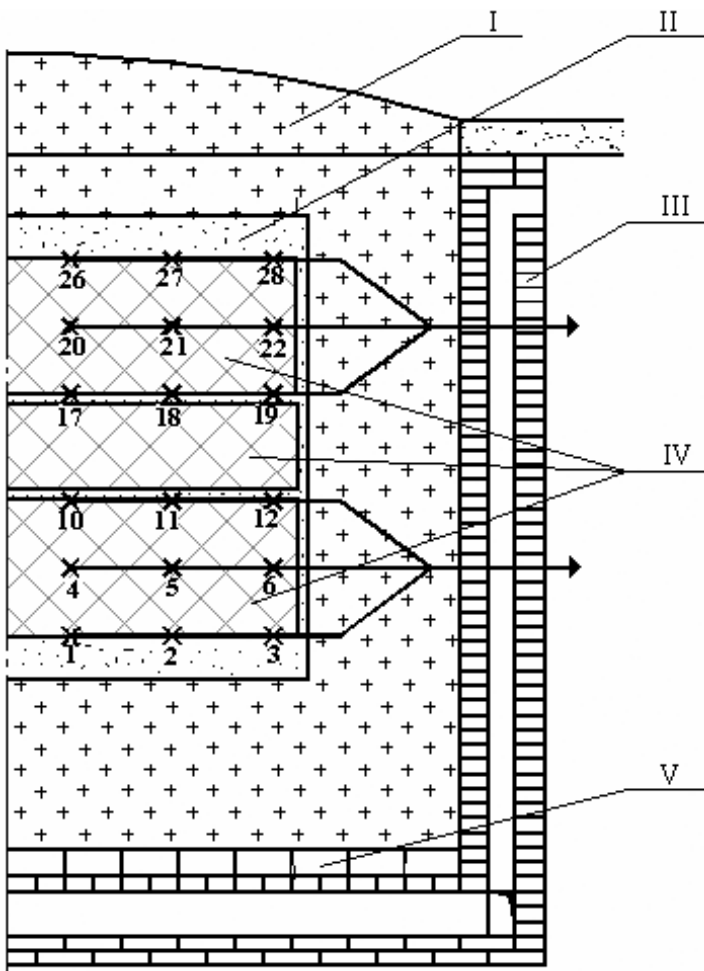
Полученные данные экспериментальных измерений позволили получить базу данных для настройки численной модели печи графитации постоянного тока.

### **Результаты математического моделирования температурных полей**

Нелинейное нестационарное уравнение теплопроводности с внутренними источниками теплоты для неоднородного тела (составной конструкции), каким является печь графитации, имеет вид

$$c_{pi}(t)\rho_i(t)\frac{\partial t}{\partial \tau} = \text{div}[\lambda_i(t)\nabla t(X)] + q_{vi}(X), \quad \tau > 0 \quad (1)$$

с соответствующими условиями однозначности (начальными, граничными, физическими) [13].

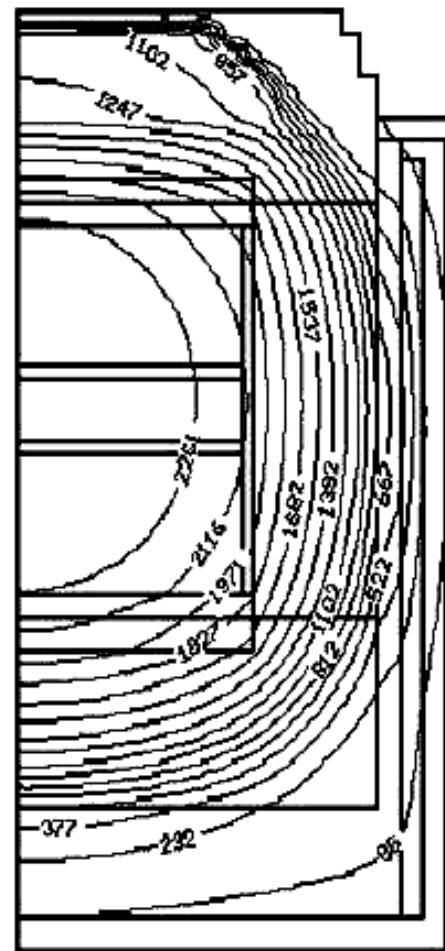


**Рис. 1. Схема установки термопар в среднем сечении печи №27 (кампания 478):**

**I – теплоизоляционная шихта; II – пересыпка; III – разделительная стенка; IV – заготовки; V – подина; 1-6, 10-13, 17-20, 26-28 – номера термопар.**

Для решения уравнения (1) использовали прямой метод граничных элементов, а численные расчеты проводили на персональной ЭВМ с использованием специально разработанного в НТУУ “КПИ” программного обеспечения, при этом для каждой кампании задавали следующие исходные данные:

- геометрические характеристики печи, заготовок и пересыпки;
- регламент ввода мощности;
- теплофизические свойства конструкционных, керновых и теплоизоляционных материалов;
- влажность материалов;
- коэффициенты теплоотдачи от стен, пола печи и верха теплоизоляции керна.



**Рис. 2. Расчетное температурное поле в поперечном сечении печи №27 (кампания 478) на момент максимальных значений температуры в заготовках (72 ч).**

Геометрические параметры модели задавали в соответствии с чертежами ОАО “Укрграфит”: размеры печи; толщину теплоизоляции снизу керна; толщину постели; диаметр, длину обожженных заготовок и количество их слоев; толщину шунтирующего бокового слоя; толщину одеяла; толщину насыпной теплоизоляции сверху керна.

Графики ввода мощности задавали в соответствии с ведомостями проведенных кампаний, а распределение теплового источника по сечению керна – в соответствии с УЭС керновых пересыпок этих же кампаний.

На рис. 2 представлено температурное поле в поперечном сечении керна печи №27 при достижении максимального значения температур в заготовках, а на рис. 4 – зависимости средних температур от относительного времени для всех

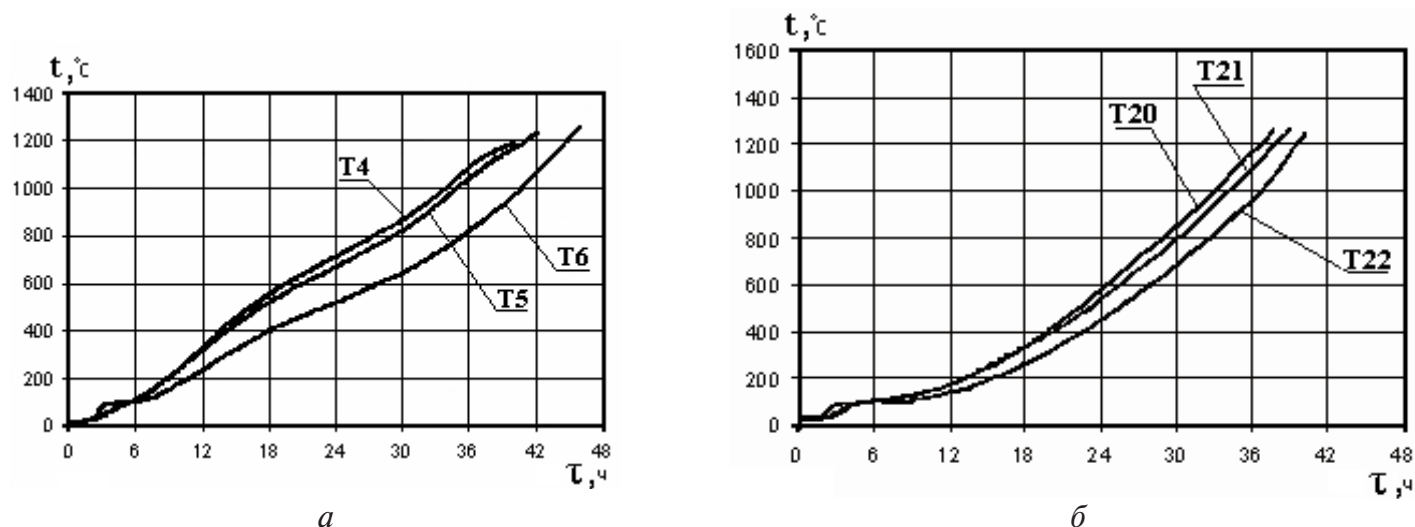


Рис. 3. Экспериментальные значения температур внутри заготовок по оси: а) – 1 ряда; б) – 3 ряда.

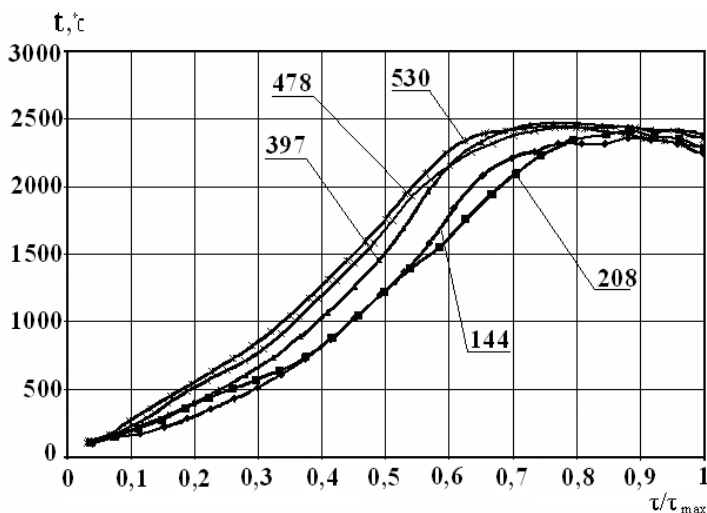


Рис.4. Зависимости средних температур заготовок в керне  $t_c$  от относительного времени кампании  $\tau / \tau_{max}$ : 144, 208, 397, 478, 530 - номера кампаний.

кампаний (относительное время – отношение текущего времени к максимальному для соответствующей кампании).

**Обобщение результатов эксперимента и численных расчетов**

Одним из параметров, характеризующих процесс графитации, как указывалось выше, является температура заготовок в печи. По этой температуре можно судить о протекающих при нагреве

заготовок процессах, а при достижении ее конечного значения 2500...3000 °С и соответствующей временной выдержке определяют завершение процесса графитации.

Выше отмечалось, что практические измерения температур составляют определенные трудности, а математическое моделирование, о чем свидетельствуют проведенные численные расчеты, связано с соответствующими временными затратами.

Поэтому практический интерес представляет получение эмпирических уравнений, с помощью которых можно было бы оперативно определять текущую температуру заготовок в зависимости от времени, конструктивных размеров керна и режимных параметров процесса графитации, а также теплофизических свойств материалов заготовок. Подобный подход использовали авторы работ [14,15] при исследовании процессов обжига подин алюминиевых электролизеров, представляющих собой монолитные устройства из угольных блоков, пространство между которыми заполнено набивной подовой массой.

Из входящих в уравнение (1) параметров составили 2 безразмерных комплекса – безразмерную среднюю температуру заготовок в керне  $\Theta$  и безразмерное время (число Фурье  $Fo$ ). Таким образом, для нестационарного режима нагрева заготовок в керне безразмерная температура  $\Theta$  для любого момента времени с начала подвода мощности, не считая периода, когда идет испарение

влаги из пересыпки и температура заготовки остается практически постоянной, зависит от числа  $Fo$ .

При определении безразмерных чисел за определяющий размер брали эквивалентный диаметр зерна  $d_{\text{ЭКВ}}$ , а теплофизические свойства материалов заготовок при различных температурах принимали по литературным данным.

Расчитанные безразмерные числа  $\Theta$  и  $Fo$  при использовании полученных на основании математического моделирования средних температур зерна, теплофизических свойств заготовок в зависимости от температуры, количества подведенной к ядру печи электроэнергии  $P_{\tau}$  для выбранных промежутков времени  $\tau$  для П-образных печей постоянного тока при графитации электродов большого диаметра представлены на рис. 5 в виде зависимости  $\Theta = f(Fo)$ . При последующей аппроксимации кривых  $\Theta = f(Fo)$  получены следующие эмпирические уравнения для расчета средних температур зерна:

- в первой области

$$\Theta = -0,0024 + 0,0847Fo, \quad (2)$$

- во второй области

$$\Theta = 0,0097 + 0,0255Fo. \quad (3)$$

Анализ полученных данных показывает, что первая область (для чисел  $Fo < 0,205$ ) характеризуется существенным ростом безразмерной температуры с увеличением числа Фурье.

При достижении числом Фурье значения  $Fo = 0,205$  наступает автомодельная область, характеризующаяся незначительным изменением величины  $\Theta$  при увеличении числа  $Fo$ .

Точку пересечения двух прямых, представленных уравнениями (2) и (3), можно считать началом процесса графитации заготовок, при котором происходит фазовый переход с уплотнением кристаллической решетки графита. Точка излома соответствует числу  $Fo = 0,205$  и безразмерной температуре  $\Theta = 0,149$ , для которой истинная температура начала графитации заготовок составляет  $t_{\text{тр}} = 2100$  °С. При дальнейшем повышении температуры процесс графитации заготовок продолжается, а заканчивается при температурах 2500...3000 °С.

Для практического пользования полученными уравнениями (2) и (3) необходимо знать геометрические размеры зерна в поперечном сече-

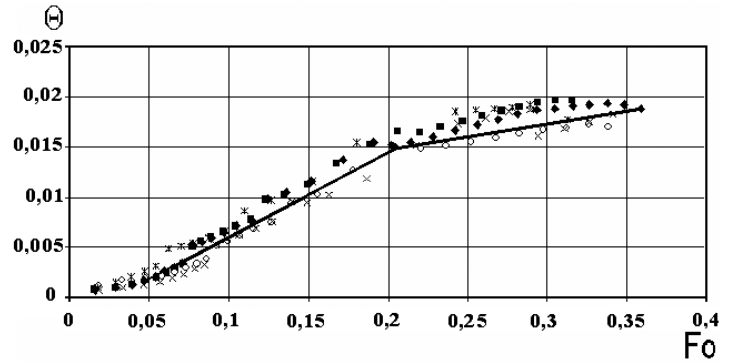


Рис. 5. Зависимость безразмерной температуры заготовок в ядре  $\Theta$  от числа Фурье  $Fo$ :

○ — камп. № 144; × — № 208; ж — № 397;  
◆ — № 478; ■ — № 530.

нии, а в процессе графитации через каждый час фиксировать затраты подводимой электроэнергии ( $P_{\tau}$ , кВт · ч).

Расчет средних температур заготовок в ядре производится в следующей последовательности:

1. Для заданного промежутка времени  $\tau$ , ч, оценивается ориентировочная средняя температура заготовок, по которой определяется их средний коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , Вт/(м · К), и средняя объемная теплоемкость  $c_p$ , Дж/(м<sup>3</sup> · К), а затем вычисляется число Фурье  $Fo$ .

2. При известных параметрах загрузки вычисляется определяющий размер  $l_o = d_{\text{ЭКВ}}$ , м.

3. По зависимости (2) или (3) вычисляется безразмерная средняя температура заготовок в ядре  $\Theta$ .

4. Действительная средняя температура заготовок в ядре для заданного промежутка времени вычисляется из следующего соотношения:

$$t_{\tau} = \frac{1000\Theta P_{\tau}}{l_o \Delta \tau \lambda}.$$

5. Для найденной действительной температуры в последовательности, описанной выше, уточняются величины  $\lambda$ ,  $c_p$ ,  $Fo$ ,  $\Theta$  и окончательное значение действительной температуры  $t_{\tau}$ .

## Выводы

1. На основании экспериментальных исследований и численных расчетов определены температурные поля П-образных печей графитации постоянного тока при графитации электродов больших диаметров.

2. Получены удобные для практического пользования эмпирические уравнения для расчета средних температур заготовок в керне для любого момента времени в зависимости от теплофизических свойств материалов, конструктивных размеров керна и режимных параметров процесса графитации.

3. Исходя из физических представлений о процессе графитации, графическим путем определена температура начала графитации электродов, составляющая около 2100 °С.

4. Полученные в работе результаты дают возможность оперативно, просто и достаточно точно определить параметры процесса графитации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Веселовский В.С.* Угольные и графитные конструкционные материалы. – М.: Наука, 1966. – 227 с.
2. *Кузин Б.М., Белоусов В.М., Булатов Г.Ф. и др.* Результаты испытаний новых схем загрузки электродов и применение унифицированной теплоизоляционной шихты в графитировочных печах // Вопросы графитации углеродистых материалов. – М.: 1968. – Ч.1. – С. 57–69.
3. *А.с. 1350110 СССР.* Способ укладки электродных заготовок в печи графитации /В.Ю. Знамеровский, В.А. Коцюр, Д.М.Кузнецов // Открытия. Изобретения. – 1987. – №41.
4. *Знамеровский В.Ю., Яшкина В.В.* Влияние удельного электросопротивления пересыпки на температурный режим печи графитации // Цветные металлы. – 1985. – №2. – С. 39–41.
5. *Wilkening S.* Zur Berechnung der Strom – und Leistungsverteilung in Acheson – Grafitierungsöfen / Proc. 3 conf. on Carbon. Baden-Baden.: 1980. – P. 477–480.
6. *Доржиев М.Н., Кузин Б.М., Шугаев Э.А.* О теплоизоляции графитировочной печи // Цветные металлы. – 1965. – №4. – С. 34–36.
7. *Смирнова В.Ю., Мокрушина О.В., Чичулин Н.И. и др.* Критерий оценки физических свойств теплоизоляционных шихт печей графитации // Производство углеродных материалов. Сб. научн. тр. – М.: НИИГрафит. – 1982. – С. 50–54.
8. *Лутков А.И., Пешкова Г.А.* Влияние температуры графитации на структуру и электрические свойства искусственного графита // Химия твердого топлива. – 1977. – №6. – С. 18–22.
9. *Соседов В.П., Сасс-Тисовский В.Б., Карманов А.С.* О рациональном графике подъема мощности и температуры в процессе графитации // Цветные металлы. – 1967. – №2. – С. 62–63.
10. *А.с. 1312074 СССР.* Способ управления процессом графитации /Ю.М. Поповкин, В.И. Кваша // Открытия. Изобретения. – 1987. – №19.
11. *Патент 228647 ГДР.* Измерительное устройство для определения конечной точки при процессах графитации по методу Ачесона //Опубликован 16.10.1985.
12. *Лелека С.В.* Измерительный комплекс для промышленного сбора и обработки экспериментальных данных // Научно – технический вестник НИЦ “Ресурсосберегающие технологии” НТУУ “КПИ”. – 2001–2003. – №1. – С. 14–15.
13. *Карвацький А.Я., Дудніков П.Й., Лелека С.В., Кутузов С.В.* Використання методу граничних елементів для розв’язання нестационарних тривимірних задач теплопровідності// Вісті Академії інженерних наук України. – 2006. – № 2(29). – С. 14 – 21.
14. *Панов Е.Н., Васильченко Г.Н., Даниленко С.В. и др.* Тепловые процессы в электролизерах и миксерах алюминиевого производства / Под общ. ред. Б.С. Громова. – М.: Издательский дом “Руда и металлы”. – 1998. – 256 с.
15. *Б.С. Громов, Е.Н. Панов, М.Ф. Боженко и др.* Обжиг и пуск алюминиевых электролизеров. / Под общ. ред. Б.С. Громова. – М.: Издательский дом “Руда и металлы”. – 2001. – 336 с.

Получено 18.10.2006 г.