

ХІМІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 669.046.41:519.6

КАРВАЦКИЙ А. Я., д.т.н., проф.; ЛЕЛЕКА С. В., н.с.; ПУЛИНЕЦ И. В., м.н.с.; ЛАЗАРЕВ Т. В., асп.
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОБЖИГА УГЛЕГРАФИТОВОЙ ПРОДУКЦИИ

Разработана методика экспериментальных исследований процесса обжига углеграфитовой продукции, что позволяет определять уровни температур в заготовках и газовых каналах в течение всей кампании печи. Полученные экспериментальные данные дают возможность анализировать тепловое состояние процесса обжига в целом и разрабатывать модернизированные регламенты обжига, они также необходимы при выполнении верификации числовых моделей теплогидродинамического состояния оборудования и задания граничных условий.

Ключевые слова: печь обжига, заготовка, экспериментальные исследования, температурное поле.

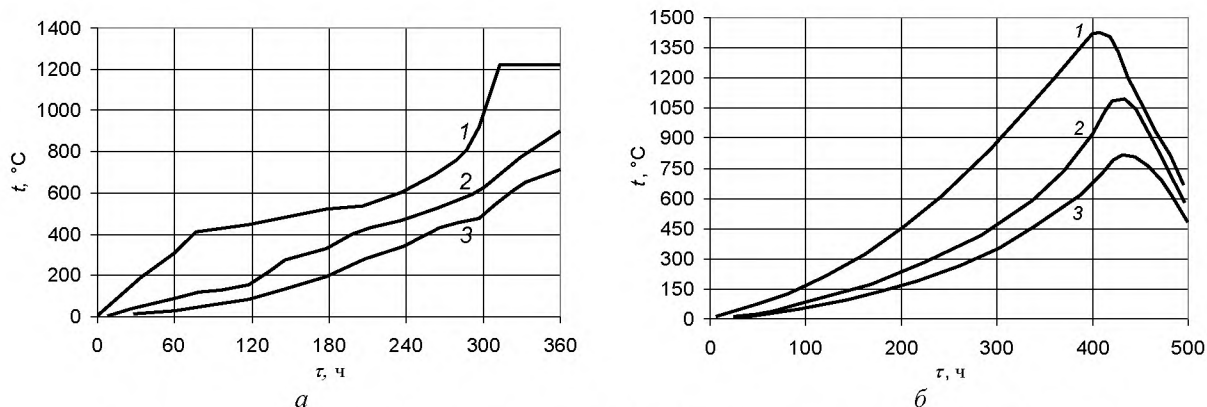
Постановка проблемы. Обжиг является одной из важнейших технологических операций цикла производства углеграфитовых изделий, которые проходят термическую обработку при температурах 900...1300 °С. При этом повышается механическая прочность материала заготовок, возрастает их электропроводность, теплопроводность и термостойкость [1].

В мировой практике производства обожженной электродной продукции наибольшее распространение получили многокамерные кольцевые печи типа Ридгаммера, нагрев заготовок в которых осуществляется за счет теплоты сжигания природного газа. В результате конструктивных особенностей работа обжиговых печей характеризуется инерционностью и неуправляемостью процесса, достаточно большой неравномерностью распределения температуры по камере (более 200 °С), значительной длительностью (350...480 ч) и большими удельными расходами энергии [2]. Поэтому одним из важнейших и актуальных заданий при производстве углеграфитовых изделий является разработка научно обоснованных технологических регламентов процесса обжига, которые обеспечивают необходимое качество конечного продукта при уменьшении длительности процесса и удельного расхода энергии. Значительную роль играют экспериментальные исследования, которые позволяют выполнить комплексную оценку теплового и газодинамического состояния обжиговых печей в условиях производства.

Анализ предыдущих исследований. В многокамерных закрытых печах Ридгаммера в силу конструктивных особенностей исключена возможность непосредственного измерения температуры электродных заготовок, обжигаемых в печи, штатными термопарами [2]. Температурный режим обжига ведется по показаниям термопары, установленной в газовом пространстве (под сводом камеры), что не дает представления о распределении температуры в заготовках и по камере печи в целом.

Авторами работы [3] экспериментальным путем установлено, что температура в газовой среде камеры печи в течение обжига на 200...300 °С выше максимальной температуры в заготовках (рис. 1, а). В объеме загрузки температура снижается сверху вниз. Это объясняется тем, что горячие дымовые газы при движении сверху вниз охлаждаются, и потому нижняя часть камеры получает меньшее количество теплоты, нежели верхняя. Перепады температур: по высоте рабочего пространства – 200...500 °С, по заготовкам – 150...200 °С. Температурные кривые соответствуют длительности обжига 420 ч (рис. 1, б). На основе этих данных невозможно установить зависимость между температурными кривыми газовой среды и загрузки. Они отличаются по абсолютным значениям температур и скоростям подъема температуры на разных этапах обжига. Максимальные температуры, достигнутые в процессе обжига: в газовой среде – 1400 °С (кривая 1), в верхней части загрузки – 1040 °С (2) и в нижней части загрузки – 820 °С (3).

Из распределения температурных полей в камере печи обжига следует, что с помощью ограниченно количества датчиков (1...3), невозможно получить полную информацию о процессах, которые протекают во всем объеме камеры печи.



1 – температура в газовому просторі; 2, 3 – температура зверху і знизу завантаження

Рис. 1 – Експериментальні дослідження розподілу температури в камері обжигової печі

Більше обширні експериментальні дослідження (25 датчиків) теплового стану печей Ридгаммера були проведені в роботі [4] (рис. 2). Графіки показують нерівномірність температурного поля в заготовках з максимальним температурним перепадом на кінець кампанії обжигу около 200 °С.

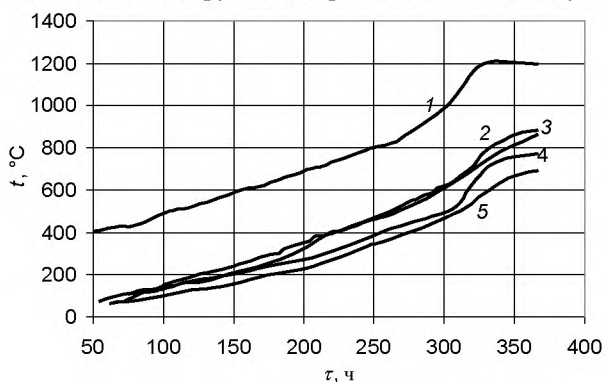
Из анализа экспериментальных данных по распределению температур при обжиге углеграфитовых изделий следует, что они являются недостаточными для определения теплового состояния обжиговых печей в целом. Вследствие этого их также недостаточно для разработки научно обоснованных регламентов, обеспечивающих рациональное расходование энергоресурсов при заданных показателях качества конечного продукта. Поэтому проведение экспериментальных исследований температурных полей в объеме всей загрузки камеры печи является актуальной задачей.

Цель и задачи исследования

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование процесса обжигу углеграфитовых электродных изделий в многокамерных печах типа Ридгаммера.

Задачами экспериментальных исследований процесса обжигу заготовок в многокамерных печах являются:

- определение уровня температур в заготовках и газовых каналах в течение всего процесса;
- определение скорости роста минимальной, максимальной и средней объемной температур в заготовках;
- определение перепада температуры по заготовкам и камере печи в целом;
- сопоставление уровня температур под сводом печи с температурами, которые достигаются в пересыпке и заготовках;
- проведение анализа теплового состояния процесса обжигу в целом.

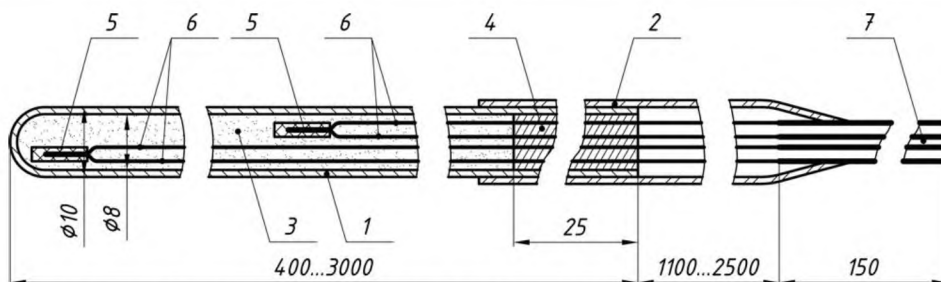


1 – температура в газовій середі;
2, 3 – температури в заготовках по висоті камери в горизонтальному розрізі, розташованому поблизу горелок;
4, 5 – температури в заготовках по висоті камери в розрізі, розташованому на відстані 3 м від горелок.

Рис. 2 – Експериментальні дослідження температурного режиму обжигу в многокамерній печі

Методика досліджень. Для динамічного контролю температури обжигових печей во время проведення експериментальних досліджень використовували: термопары хромель-алюмелевіе з діапазоном вимірювання температур від мінус 50 до 1100...1200 °С (кратковременні вимірювання до 1300 °С) [5] (рис. 3); термомеханічні датчики (кольця контролю температури – рис. 4) з діапазоном вимірювання температур 660...1850 °С (виробництва компанії М. Е. SCHUPP, Німеччина) [6].

Контроль і збір даних від термодатчиків проводили з використанням автоматизованого вимірювального комплексу, розробаного НІЦ «Ресурсозберігаючі технології» (рис. 5) [7].



1 – чехол из нержавеющей стали; 2 – рукав из кремнийорганической резины; 3 – оксид магния; 4 – пробка из оксида магния и высокотемпературного клея; 5 – горячие спаи в алундовой одноканальной солодке; 6 – электроды термопар, электроизолированные муллитокремнеземной оплеткой; 7 – наружные концы термопар во фторопластовой изоляции

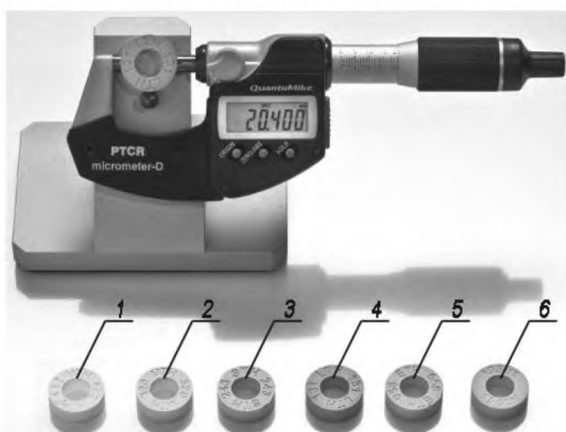
Рис. 3 – Конструкция хромель-алюмелевого термодатчика с двумя термопарами

Комплекс базируется на модулях сбора данных I-7018 производства компании ICP_DAS, имеющих восемь отдельных аналоговых входов и датчик температуры холодных спаев – терморезистор, расположенный возле контактных площадок модуля. Дискретность опроса модулей сбора данных достигает 10 Гц. Модули I-7018 имеют гальваническую развязку до 3000 В и связываются в измерительную сеть с помощью полудуплексного многоточечного последовательного интерфейса RS-485. Количество модулей

в сети может достигать 254 шт. Для связи модулей сбора данных с ПК измерительного комплекса используется модуль преобразования интерфейсов RS-485↔RS-232 – I-7520 (ICP_DAS), который также имеет гальваническую развязку до 3000 В.

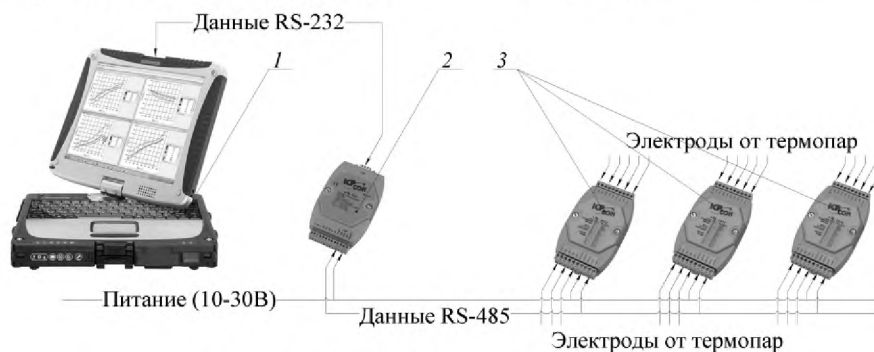
Запрос и обработка данных выполняются установленным на ПК программным обеспечением, разработанным специалистами НИЦ «РТ» и позволяет проводить:

- формирование и тестирование сети модулей сбора данных;
- выбор частоты опроса (до 1 Гц);
- выбор типа датчика (ТХА, ТВР, ППР, ПР, напряжение, сила тока);
- сохранение данных на внешнем или внутреннем носителе с возможностью указания частоты сохранения;
- отображение данных на экране в реальном времени.



1 – RTC-AQS (660... 1000 °C); 2 – ETH (850... 1100 °C);
3 – LTH (970... 1250 °C); 4 – STH (1130... 1400 °C);
5 – MTH (1340... 1520 °C); 6 – HTH (1450... 1 750 °C).

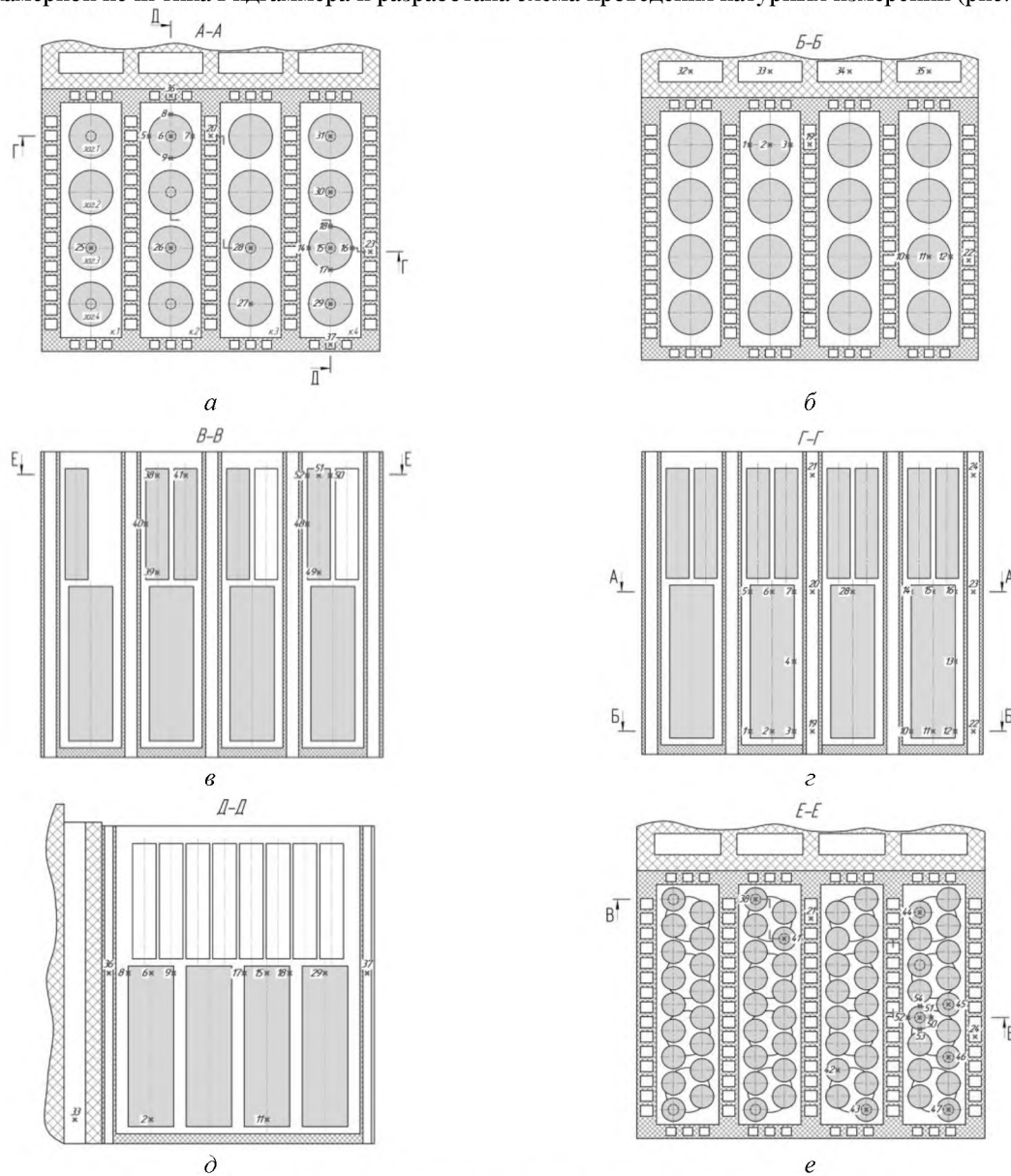
Рис. 4 – Термомеханические датчики производства компании M. E. SCHUPP



1 – персональный компьютер; 2 – модули сбора данных I-7018;
3 – модуль-преобразователь интерфейсов RS-485↔RS-232 – I-7520.

Рис. 5 – Схема измерительного комплекса

Схема измерений. В соответствии с поставленными задачами и программой экспериментальных исследований, выбрана кампания обжига углеграфитовых заготовок $\varnothing 600 \times 2245$ мм и $\varnothing 325 \times 1610$ мм в многокамерной печи типа Ридгаммера и разработана схема проведения натурных измерений (рис. 6).

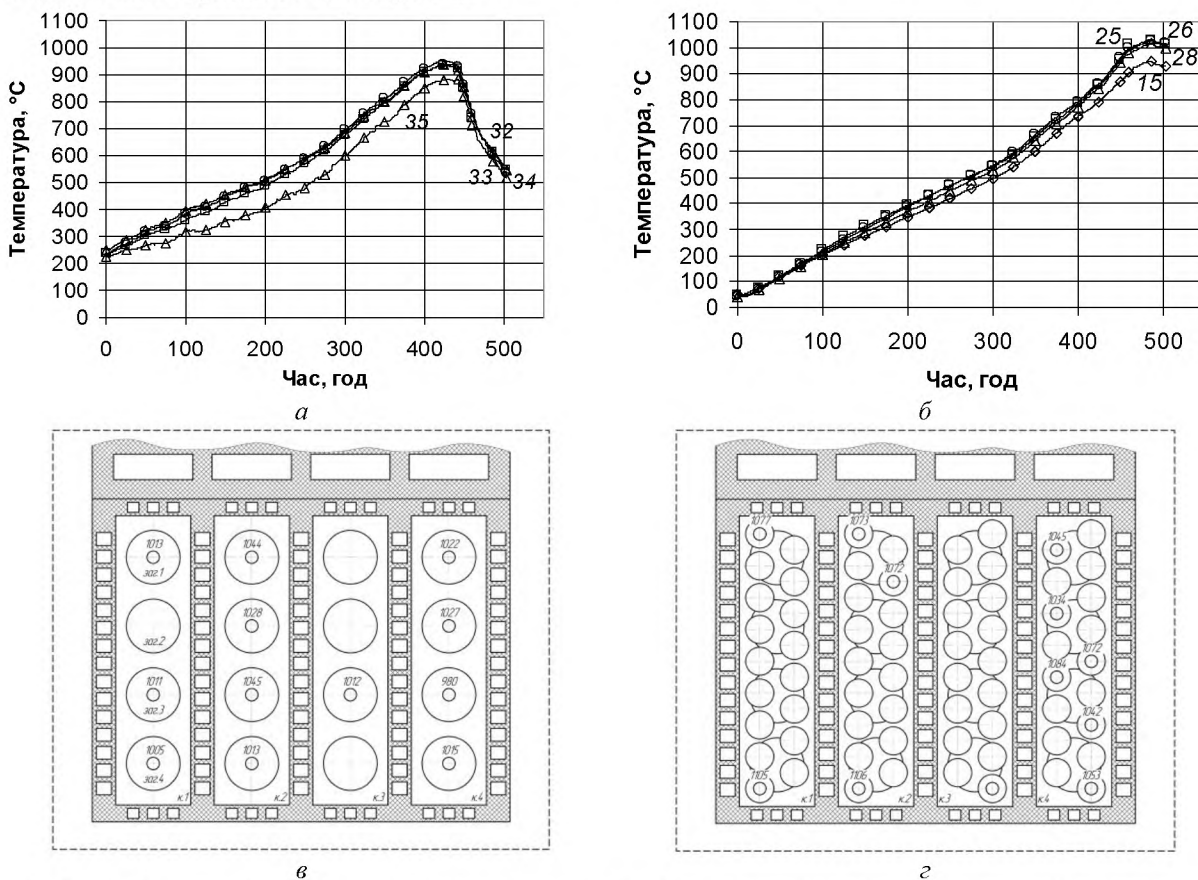


а, б – схема установки термопар на расстоянии 100 мм от верхних и нижних торцов заготовок $\varnothing 600 \times 2245$ мм; в, г, д – схема установки термопар по высоте камеры печи; е – схема установки термопар на расстоянии 100 мм от верхних торцов заготовок $\varnothing 325 \times 1690$ мм.

Рис. 6 – Схема установки термометрического оборудования в экспериментальной кампании печи

Результаты экспериментальных исследований и их анализ. При длительной работе в области высоких температур (свыше 800 °С) хромель-алюмелевые термопары выходят из строя, в связи с этим уточнение экспериментальных данных обжига в интервале температур свыше 800 °С осуществлялось с использованием данных по термометрическим кольцам (по которым определялся уровень максимальных температур торцов заготовок) и по результатам численного моделирования теплогидродинамического состояния камеры печи обжига.

В результате обработки данных получены графики роста температур в заготовках и газовых каналах в течение всего процесса обжига (рис. 7).



а, б – показання термомпар; в, з – максимальная температура центров верхних торцов заготовок, зафиксированная с помощью термомеханических датчиков нижнего и верхнего уровня загрузки соответственно; 15, 25, 26, 28, 32-35 – номера термомпар (см. рис. б).

Рис. 7 – Результаты экспериментальных исследований

Анализ полученных экспериментальных данных показывает:

на протяжении всего обжига температура газовой среды в огневом колодце кассеты 4 отстает на 70...100 °С по сравнению с температурой в огневых колодцах кассет 1...3;

на протяжении всего обжига наименее нагретыми являются заготовки, расположенные возле огневых колодцев, а наиболее нагретыми – возле нижних торцевых каналов. Причиной такого распределения температуры, скорее всего, является гидродинамика газовых потоков, а именно более низкая скорость газовых потоков в каналах, расположенных возле огневых колодцев. Более низкая скорость газовых потоков в указанных каналах может быть связана с геометрией свода и расположением огневых колодцев;

в поперечном сечении камеры наименее нагретыми являются заготовки 4 кассеты, разница температур составляет порядка 75 °С на конец обжига.

Оценочные значения максимальных, минимальных, среднеобъемных температур и максимального перепада температур в эксперименте составили:

для заготовок Ø 600×2245 мм – максимальная температура – 1050 °С, минимальная – 945 °С, среднеобъемная – 985 °С, перепад температур – 105 °С;

для заготовок Ø 325×1610 мм – максимальная – 1092 °С, минимальная – 950 °С, среднеобъемная – 1045 °С, перепад – 142 °С;

для всех заготовок – максимальная – 1092 °С, минимальная – 945 °С, среднеобъемная – 1010 °С, перепад температур – 147 °С.

Выводы. Полученные экспериментальные данные используются для определения закономерностей изменения температуры, определения тепловых потерь, составления тепловых балансов печей обжига Ридгаммера в зависимости от параметров технологического регламента процесса обжига, что является основой для разработки модернизированных технологических инструкций ведения процесса, направленных на повышение качества электродов и энергосбережение производства в целом. Полученные экспериментальные данные температурно-тепловых полей также необходимы для проведения верификации разработанных численных моделей и задания граничных условий при выполнении численного анализа.

Список использованной литературы

1. Чалых Е. Ф. Оборудование электродных заводов / Е. Ф. Чалых. – М. : Металлургия, 1990 – 238 с.
2. Санников А. К. Производство электродной продукции / А. Б. Сомов, В. В. Ключников А. К. Санников. – М. : Металлургия, 1985. – 128 с.
3. Чалых Е. Ф. Технология и оборудование электродных и электроугольных предприятий / Е. Ф. Чалых. – М. : Металлургия, 1972. – 432 с.
4. Малахов С. А. Совершенствование технологии обжига углеграфитовой продукции в многокамерных печах обжига закрытого типа : автореф. дис... канд. техн. наук : 05.16.02 / С. А. Малахов. – Владикавказ, 2004. – 30 с.
5. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы : учебн. [для вузов] / В. П. Преображенский. – М. : Энергия, 1978. – 704 с.
6. High temperature technology [Электронный ресурс] / М. Е. SCHUPP. – Режим доступа : <http://www.schupp-ceramics.com/en/products/measuring/> (дата звернення 01.05.10).
7. Панов Е. Н. Комплекс сбора данных для высокотемпературных промышленных агрегатов / Е. Н. Панов, С. В. Лелека, М. В. Коржик // ПиКАД. – 2005. – № 2. – С. 28-30.

Надійшла до редакції 01.09.2012.

Karvatskyi A. Ya., Leleka S. V., Pulynets Y. V., Lazarev T. V.

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF PROCESS OF BURNING OF CARBON-GRAPHITE ELECTRODE PRODUCTS

The experimental investigation technique of baking carbon-graphite electrode products was developed. This technique allows determining the temperature levels in the blanks and flue gas ducts throughout the furnace campaign. The finding experimental data make it possible to analyze the thermal state of the baking process as a whole and develop modernized baking regulations, as well as necessary in the performance verification of numerical models of heat and hydrodynamic state of the equipment and the boundary conditions.

Keywords: *baking furnace, blank, experimental investigation, temperature field.*

References

1. Chalyh, E. F. Oborudovanie jelektroodnyh zavodov [Equipment of electrode plants] / E. F. Chalyh. – М. : Metallurgija, 1990. – 238 p.
2. Sannikov, A. K. Proizvodstvo jelektroodnoj produkcii [Production of electrode products] / A. B. Somov, V. V. Kljuchnikov, A. K. Sannikov. – М. : Metallurgija, 1985. – 128 p.
3. Chalyh, E. F. Tehnologija i oborudovanie jelektroodnyh i jelektroougol'nyh predpriyatij [Technology and equipment of the electrode and electric carbonic enterprises] / E. F. Chalyh. – М. : Metallurgija, 1972. – 432 p.
4. Malahov, S. A. Sovershenstvovanie tehnologi obzhiga uglegrafitovoj produkcii v mnogokamernyh pechah obzhiga zakrytogo tipa [Improvement technologists of burning of carbon and graphite production in multichamber furnaces of the closed type] : avtoref. dis... kand. tehn. nauk : 05.16.02 [Metallurgy of ferrous, non-ferrous and rare metals] / S. A. Malahov. – Vladikavkaz, 2004. – 30 p.
5. Preobrazhenskij, V. P. Teplotehnicheskie izmerenija i pribory [Heattechnical measurements and devices] / V. P. Preobrazhenskij. – М. : Jenergija, 1978. – 704 p.
6. High temperature technology / Schupp. – <http://www.schupp-ceramics.com/en/products/measuring/>.
7. Panov, E. N. Kompleks sbora dannyh dlja vysokotemperaturnyh promyshlennyh agregatov [Data collection complex for high-temperature industrial units] / E. N. Panov, S. V. Leleka, M. V. Korzhik // PiKAD. – 2005. – No 2. – P. 28-30.