

УДК 621.3.035.2:536.5

ПАНОВ Е.Н.¹, КУТУЗОВ С.В.², ЛЕЛЕКА С.В.¹, ШИЛОВИЧ И.Л.¹, БОЖЕНКО М.Ф.¹

¹ *Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»*

² *Открытое акционерное общество «Украинский графит»*

БЕЗРАЗМЕРНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ КЕРНА В П-ОБРАЗНЫХ ПЕЧАХ ГРАФИТАЦИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

РЕЗЮМЕ

Приведены результаты экспериментальных исследований и численных расчетов температурных полей П-образных печей графитации постоянного тока. Предложены безразмерные 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.

Рис. 5, библиогр. 14 наим.

PANOV Ye.N.¹, KUTUZOV S.V.², LELEKA S.V.¹, SHILOVICH I.L.¹, BOZENKO M.F.¹

¹ *National technical University of Ukraine “Kiev Polytechnical Institute”*

² *Public corporation “Ukrainian Graphite”*

DIMENSIONLESS EQUATIONS FOR TEMPERATURE FIELD EVALUATION OF THE KERN IN n-SHAPED DIRECT CURRENT GRAPHITATION KILNS

ABSTRACT

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

Fig. 5, references 14 titles.

!!!!!! - Отправлена в редакцию 19.10.06 г. (Отвозила Оля)

УДК 621.3.035.2:536.5

ПАНОВ Є.М.¹, КУТУЗОВ С.В.², ЛЕЛЕКА С.В.¹, ШИЛОВИЧ І.Л.¹, БОЖЕНКО М.Ф.¹

¹ *Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»*

² *Відкрите акціонерне товариство «Український графіт»*

БЕЗРОЗМІРНІ РІВНЯННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ КЕРНА В П-ПОДІБНИХ ПЕЧАХ ГРАФІТАЦІЇ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

РЕЗЮМЕ

Наведені результати експериментальних досліджень і числових розрахунків температурних полів П-подібних печей графітації постійного струму. Запропоновані безрозмірні рівняння для визначення середніх температур заготовок в керні для будь-якого проміжка часу в залежності від теплофізичних властивостей матеріалів, конструктивних розмірів керна і режимних параметрів процесу графітації.

Рис. 5, бібліогр. 14 найм.

УДК 621.3.035.2:536.5

ПАНОВ Е.Н.¹, КУТУЗОВ С.В.², ЛЕЛЕКА С.В.¹, ШИЛОВИЧ И.Л.¹, БОЖЕНКО М.Ф.¹

¹ *Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»*

² *Открытое акционерное общество «Украинский графит»*

БЕЗРАЗМЕРНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ КЕРНА В П-ОБРАЗНЫХ ПЕЧАХ ГРАФИТАЦИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

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 совершенствованием технологии 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 одевали двухканальную алундовую соломку, горячий спай термопары сваривали в среде гелия, после чего термопару помещали в мулито-кремнеземистый чехол МКРЦ с температурой допустимого применения до 1800°C. 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 кремнеземистой 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.2 – 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

Следует отметить, что при настройке численной модели одним из наиболее важных этапов является задание условий однозначности и теплофизических свойств материалов. Данные по теплофизическим свойствам материалов, используемых в технологическом процессе, представлены в литературе в ограниченном количестве, особенно при температурах свыше 500...800 °С. Поэтому полученные экспериментальные температурные поля имеют важное значение при проверке результатов численного моделирования.

Численные расчеты проводили на персональной ЭВМ с использованием специально разработанного в НТУУ «КПИ» программного обеспечения применительно к печам графитации постоянного тока, 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.

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

Обобщение результатов эксперимента и численных расчетов в безразмерной форме

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°C 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 безразмерных 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 [13,14] при исследовании процессов обжига подин алюминиевых электролизеров, представляющих собой монолитные устройства из угольных блоков, пространство между которыми заполнено набивной подовой массой.

Итак, для нестационарного режима нагрева тел, что имеет место в печах графитации, некоторая условная безразмерная средняя температура заготовок в керне Θ для любого момента времени с начала подвода мощности, не считая периода, когда идет испарение влаги из пересыпки и температура остается практически постоянной, зависит от безразмерного времени (числа Фурье Fo).

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

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

- в первой области

$$\Theta = - 0,0024 + 0,0847Fo \quad (1)$$

- во второй области

$$\Theta = 0,0097 + 0,0255Fo \quad (2)$$

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 Θ при увеличении числа Fo .

Точку пересечения двух прямых, представленных уравнениями (1) и (2), 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 $t_{гр} = 2100$ °С. При дальнейшем повышении температуры процесс графитации заготовок продолжается, а заканчивается при температурах 2500 – 3000 °С.

Для практического пользования полученными уравнениями (1) и (2) необходимо знать геометрические размеры керны в поперечном сечении, а в процессе графитации через каждый час фиксировать затраты подводимой электроэнергии (P_{τ} , кВт·ч).

Расчет средних температур заготовок в керне производится в следующей последовательности:

1. Для заданного промежутка времени $\Delta\tau$, ч, оценивается ориентировочная средняя температура заготовок, по которой определяется их средняя теплопроводность λ , Вт/(м·К), и средняя объемная теплоемкость $с\rho$, Дж/(м³·К), а затем вычисляется число Фурье Fo .

2. При известных параметрах загрузки вычисляется определяющий размер $\ell_o = d_{эКВ}$, м.

3. По зависимости (1) или (2) вычисляется безразмерная средняя температура заготовок в керне Θ .

4. Действительная средняя температура заготовок в керне для заданного промежутка времени вычисляется из следующего соотношения:
$$t_{\tau} = \frac{10000\Theta P_{\tau}}{\ell_o \Delta\tau \lambda}.$$

5. Для найденной действительной температуры в последовательности, описанной выше, уточняются величины λ , $с\rho$, Fo , Θ и окончательное значение действительной температуры t_{τ} .

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 безразмерные уравнения для расчета средних температур заготовок в керне для любого момента времени в зависимости от теплофизических свойств материалов, конструктивных размеров керны и режимных параметров процесса графитации.

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

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.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.

14.Обжиг и пуск алюминиевых электролизеров / Б.С. Громов, Е.Н. Панов, М.Ф. Боженко и др. / Под общ. ред. Б.С. Громова. – М.: Издательский дом «Руда и металлы».- 2001. – 336 с.

Авторы:

Панов Е.Н.

Кутузов С.В.

Лелека С.В.

Шилович И.Л

Боженко М.Ф.

УДК 621.3.035.2:536.5

ПАНОВ Е.Н.¹, КУТУЗОВ С.В.², ЛЕЛЕКА С.В.¹, ШИЛОВИЧ И.Л.¹, БОЖЕНКО М.Ф.¹

¹ *Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»*

² *Открытое акционерное общество «Украинский графит»*

БЕЗРАЗМЕРНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ КЕРНА В П-ОБРАЗНЫХ ПЕЧАХ ГРАФИТАЦИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

c_p – удельная объемная теплоемкость материала заготовок;

$d_{\text{экв}} = 4Nb/(N+b)$ – эквивалентный диаметр керна;

$Fo = \lambda \Delta \tau / c_p \ell_o^2$ – число Фурье;

N и b – высота и ширина керна соответственно;

ℓ_o – определяющий размер;

P_τ – количество подведенной электрической энергии;

t_τ – текущая истинная средняя температура заготовок в керне;

$\Theta = t_\tau \ell_o \Delta \tau \lambda / P_\tau$ – безразмерная температура;

λ – теплопроводность материала заготовок;

$\Delta \tau$ – время с начала подвода мощности.

Нижние индексы:

гр – графитация;

экв – эквивалентный;

τ – время.

Сокращения:

ВР – вольфрам-рений;

УЭС – удельное электрическое сопротивление;

ХА – хромель-алюмель.

УДК 621.3.035.2:536.5

ПАНОВ Е.Н.¹, КУТУЗОВ С.В.², ЛЕЛЕКА С.В.¹, ШИЛОВИЧ И.Л.¹, БОЖЕНКО М.Ф.¹

¹ *Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»*

² *Открытое акционерное общество «Украинский графит»*

БЕЗРАЗМЕРНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ КЕРНА В П-ОБРАЗНЫХ ПЕЧАХ ГРАФИТАЦИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ПОДРИСУНОЧНЫЕ ПОДПИСИ:

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.

Рис.2. Экспериментальные значения температур внутри заготовок по оси:

а). 1 ряда; б). 3 ряда.

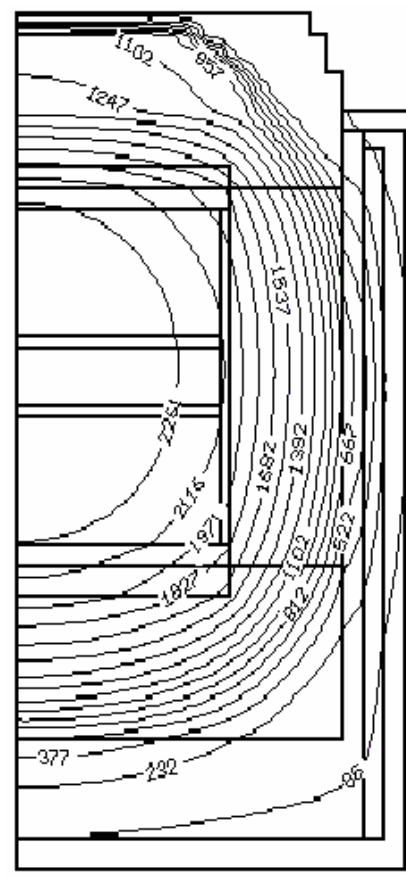
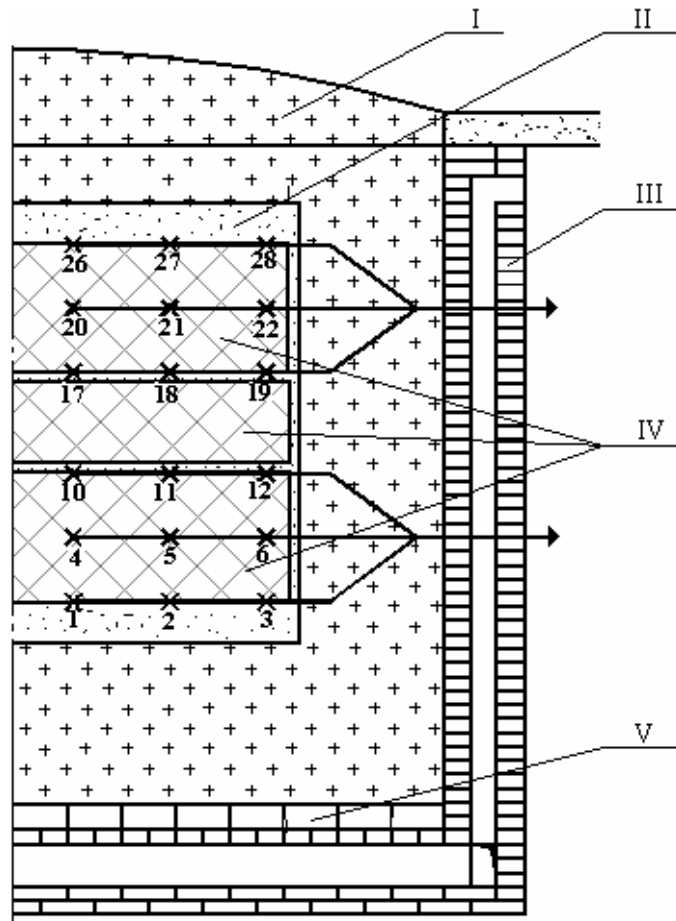
Рис.3. Расчетное температурное поле в поперечном сечении печи №27 (кампания 478) на момент максимальных значений температуры в заготовках (72 ч).

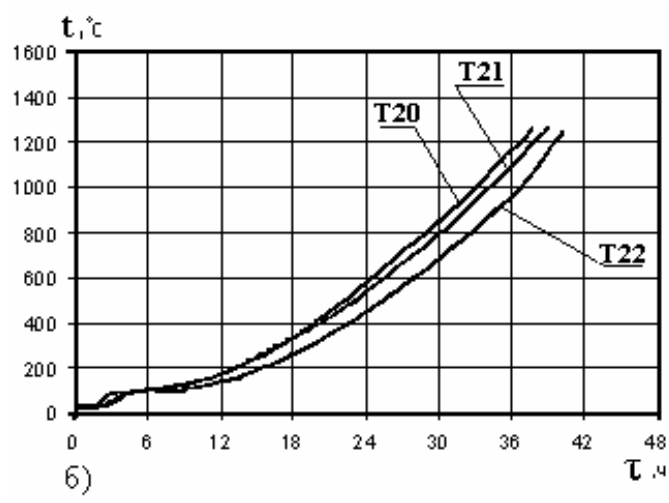
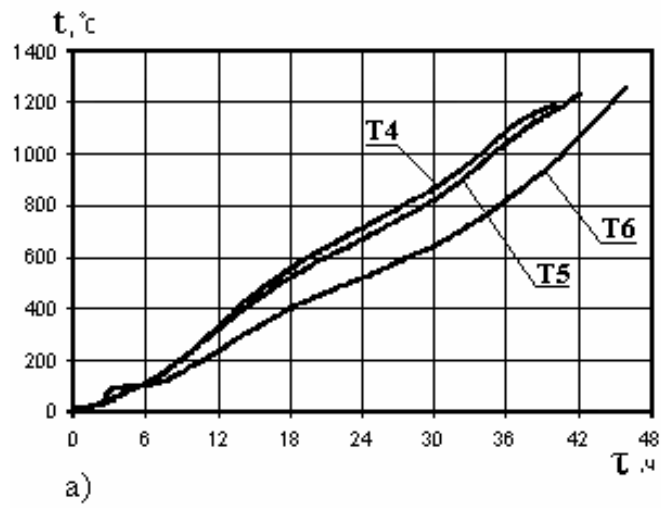
Рис.4. Зависимости средних температур заготовок в керне t_{τ} от относительного времени кампании τ / τ_{\max} :

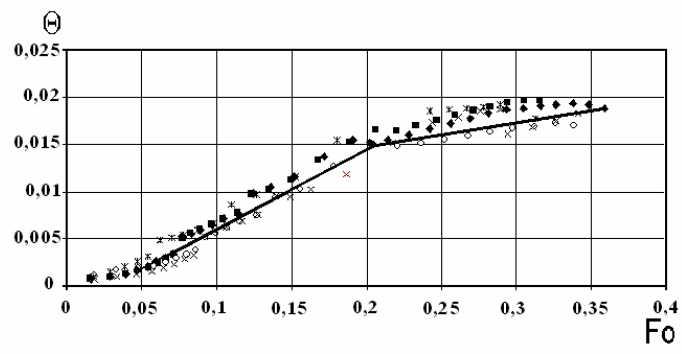
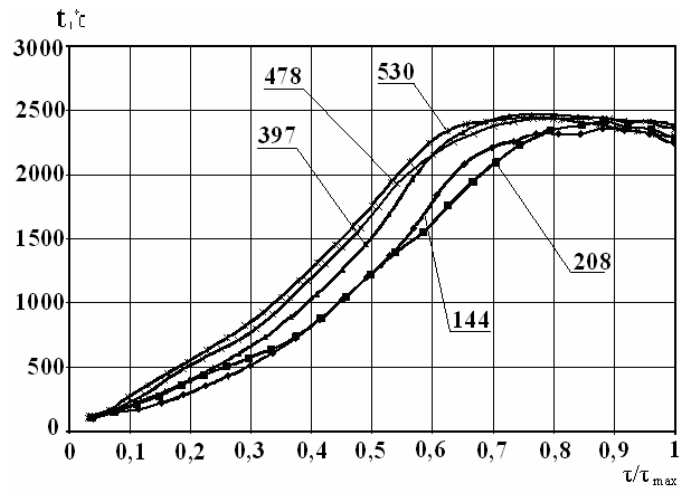
144, 208, 397, 478, 530 – номера кампаний.

Рис.5. Зависимость безразмерной температуры заготовок в керне Θ от числа Фурье Fo :

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







СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ СТАТЬИ

«Безразмерные уравнения для определения температурных полей керн в П-образных печах графитации постоянного тока»

1. Панов Евгений Николаевич, декан инженерно-химического факультета, зав. кафедрой химического, полимерного и силикатного машиностроения НТУУ «КПИ», д.т.н., профессор.

Домашний адрес: 02192, Киев-192, Дарницкий бульвар 7, кв. 81.

Телефоны : служебный – (044)236-40-52; домашний – (044)543-15-40.

2. Кутузов Сергей Владимирович, генеральный директор ОАО «Укрграфит».

Домашний адрес: 69065, Запорожье-65, ул. Квитуча 34,б.

Телефоны: служебный – (061)289-51-10; домашний – (061)224-81-10.

3. Лелека Сергей Владимирович, научный сотрудник научно-исследовательского центра «Ресурсосберегающие технологии» НТУУ «КПИ».

Домашний адрес: Черкасская обл., г. Золотоноша, ул. Благовещенская, 84.

Телефоны: служебный – (044)241-86-09.

4. Шилович Игорь Леонидович, доцент кафедры химического, полимерного и силикатного машиностроения НТУУ «КПИ», к.т.н.

Домашний адрес: 03049, Киев-49, ул. Курская 13, кв. 23.

Телефоны: служебный – (044)241-68-61; домашний – (044)245-09-68.

5. Боженко Михаил Федорович, доцент кафедры теоретической и промышленной теплотехники НТУУ «КПИ», к.т.н.

Домашний адрес: 03056, Киев-56, Проспект Победы 37, д.4, кв. 14.

Телефоны: служебный - (044)241-68-61; домашний – (044)489-16-77.

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Зам. декана інженерно-хімічного
факультету

_____ А.І. Жученко

“ ___ ” _____ 2006 р.

ЕКСПЕРТНИЙ ВИСНОВОК № _____
про можливість опублікування матеріалів
в засобах масової інформації в Україні

Експертна комісія інженерно-хімічного факультету Національного
технічного університету України "Київський політехнічний інститут",
розглянувши матеріал статті “Безразмерные уравнения для определения
температурных полей ядра в П-образных печах графитации
постоянного тока»

Панова Є.М., Кутузова С.В., Шиловича І.Л., Лелеки С.В., Боженка М.Ф.,
загальним обсягом 11 сторінок друкованого тексту, 5 рис., підтверджує, що в
матеріалах

не містяться відомості, заборонені до опублікування.

ВИСНОВОК: Розглянувши матеріал статті, комісія вирішила, що в ньому:

- відсутні обмеження за п.п. 11.1...11.5 „Тимчасового переліку” 1992 р;
- немає відомостей, опублікування яких відповідно до „Зводу відомостей,
що становлять державну таємницю” (затверджено наказом СБУ №440
від 12.08.2005 р. та зареєстровано в Міністерстві юстиції України
17.08.2005 р. за №902/11182), обмежується;
- відсутні матеріали, на які можуть бути оформлені патенти;
- матеріал може бути опублікований в засобах масової інформації.

Голова комісії к.т.н., проф. _____ М.З. Кваско

Члени комісії: к.т.н., проф. _____ М.Д. Сівецький

д.т.н., проф. _____ О.С. Сахаров

Нач. відділу секретного діловодства _____ В.П.Котигорошко

Заст.начальника відділу КОІВ _____ Л.М. Попова

Секретар комісії _____ Л.Ф. Семікіна

“ ___ ” _____ 2006 р.

ВИТЯГ

з протоколу № 50 засідання науково-технічної ради науково-дослідного центру
«Ресурсозберігаючі технології» НТУУ «КПІ»
від 11 вересня 2006 р.

СЛУХАЛИ: Розгляд матеріалів статей «Безразмерные уравнения для определения температурных полей керны в П-образных печах графитации постоянного тока» (автори Панов Є.М., Кутузов С.В., Лелека С.В., Шилович І.Л., Боженко М.Ф.) и «Оценка энергетической эффективности печей графитации постоянного тока» (автори Панов Є.М., Кутузов С.В., Шилович І.Л., Лелека С.В., Боженко М.Ф.) на предмет опублікування в засобах масової інформації.

УХВАЛИЛИ: Рекомендувати вказані вище статті до опублікування у засобах масової інформації.

Секретар НТР
НДЦ «РТ»

Шилович Т.Б.

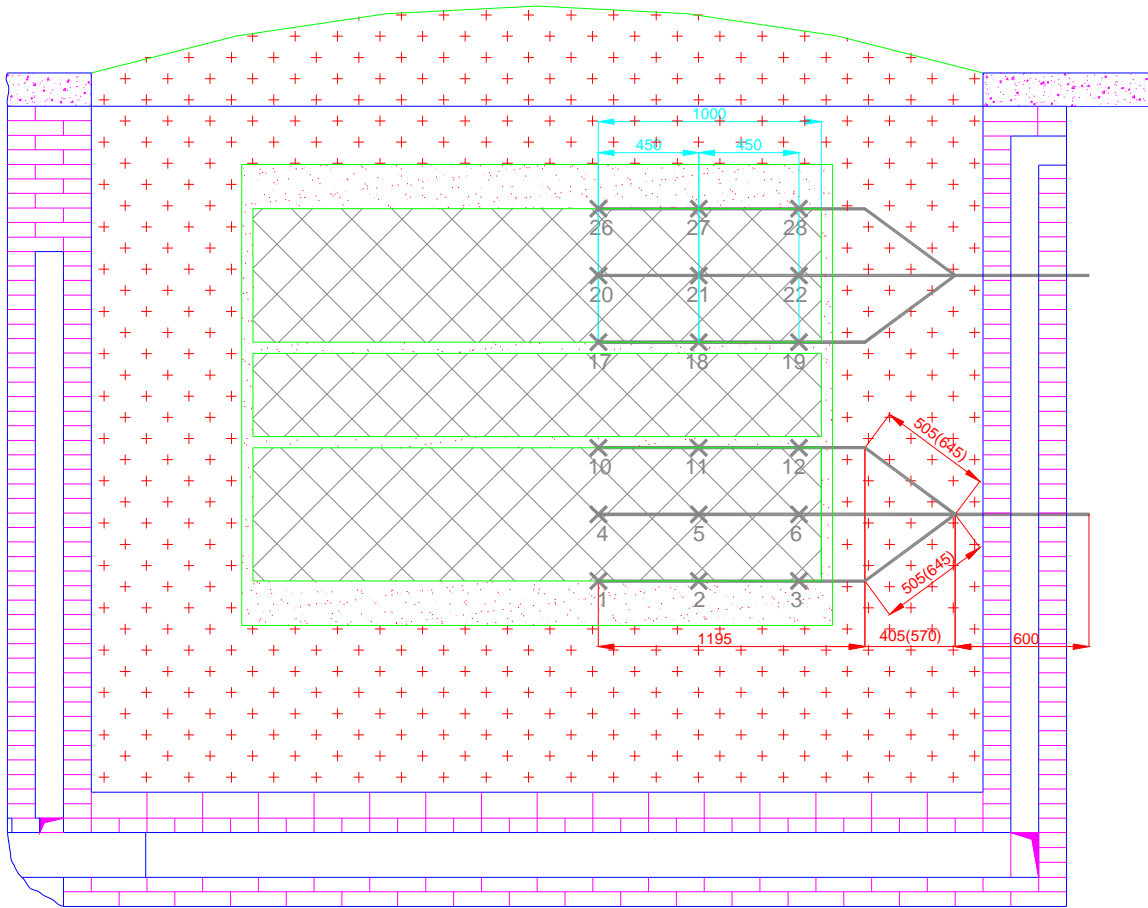
Редакції журналу
«Промышленная теплотехника»

03057, Київ 57, вул. Желябова 2а,
Інститут технічної теплофізики
НАН України

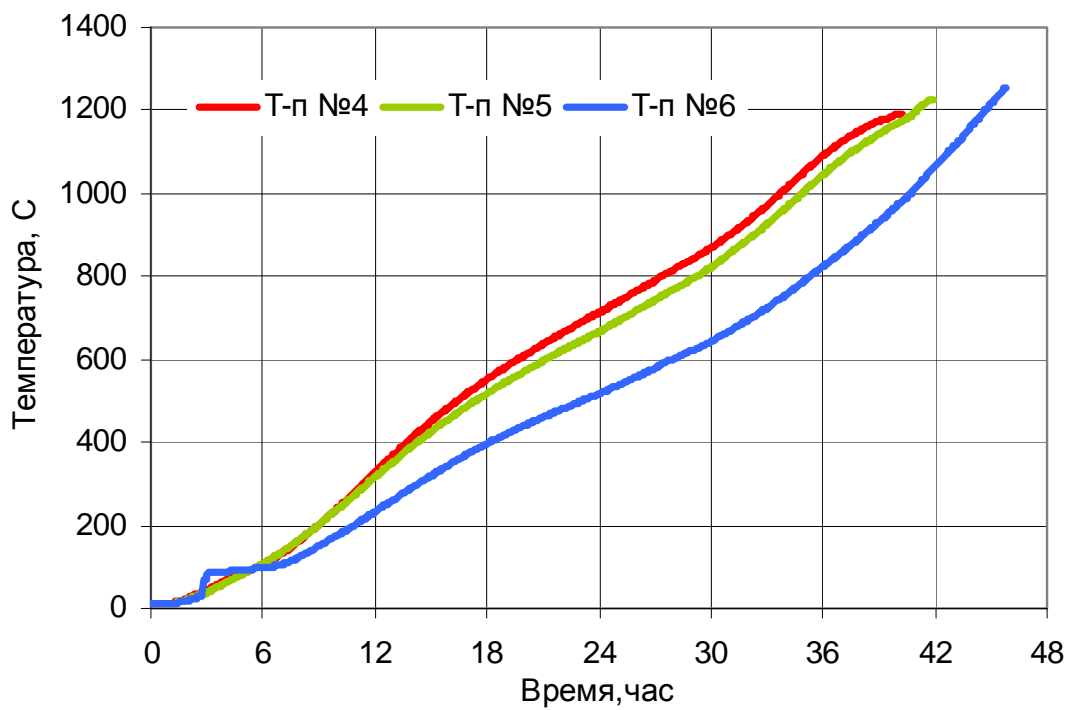
Направляємо для опублікування в міжнародному науково-прикладному журналі «Промышленная теплотехника» статтю Панова Є.М., Кутузова С.М., Лелеки С.В., Шиловича І.Л., Боженка М.Ф. «Безразмерные уравнения для определения температурных полей керна в П-образных печах графитации постоянного тока».

Зам. декана ІХФ
НТУУ «КПІ»

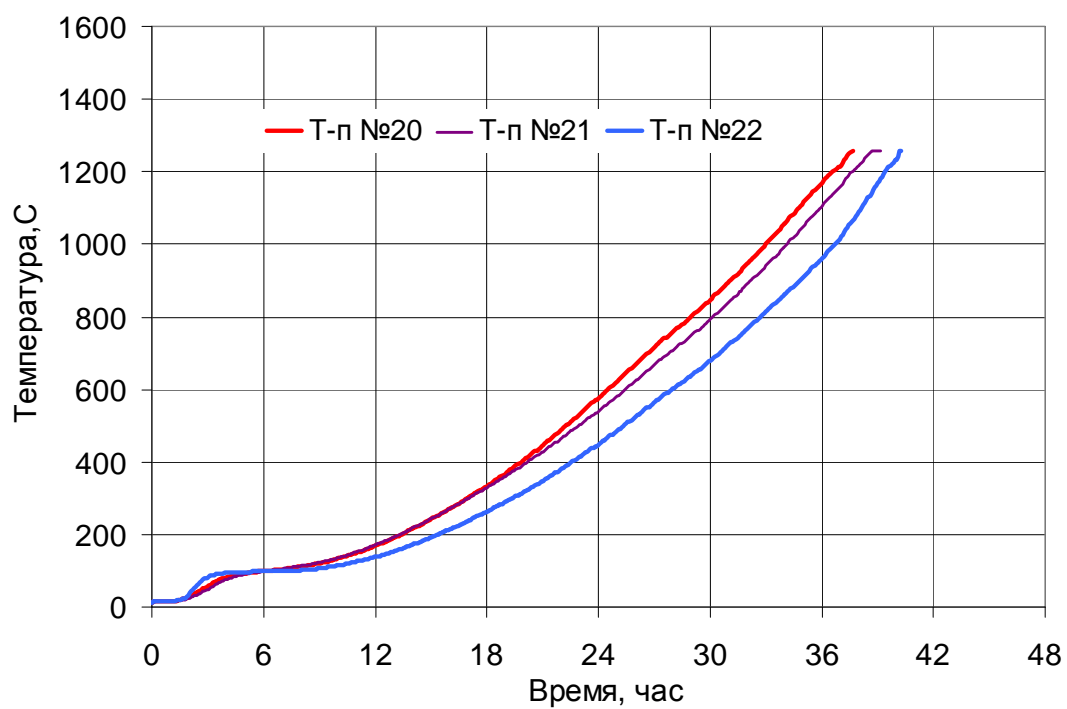
Жученко А.І.

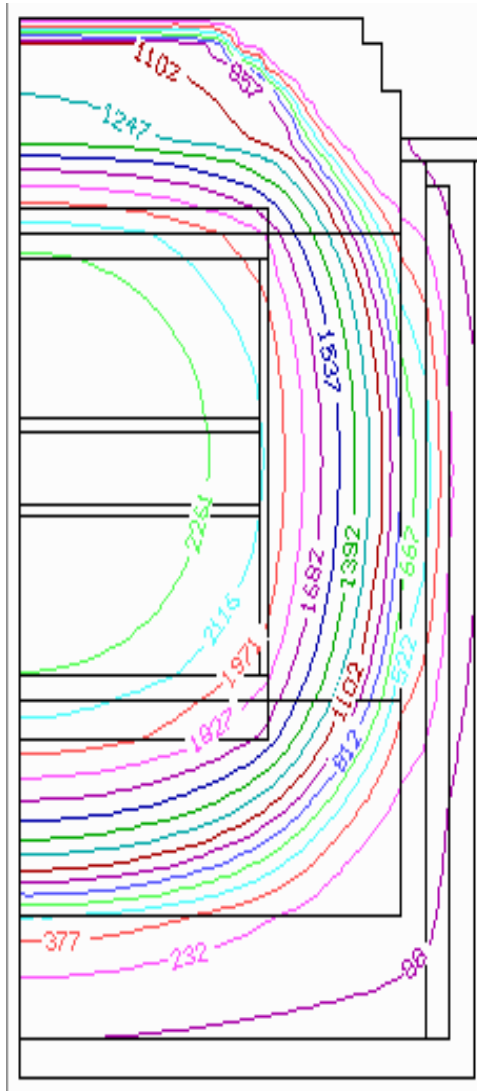


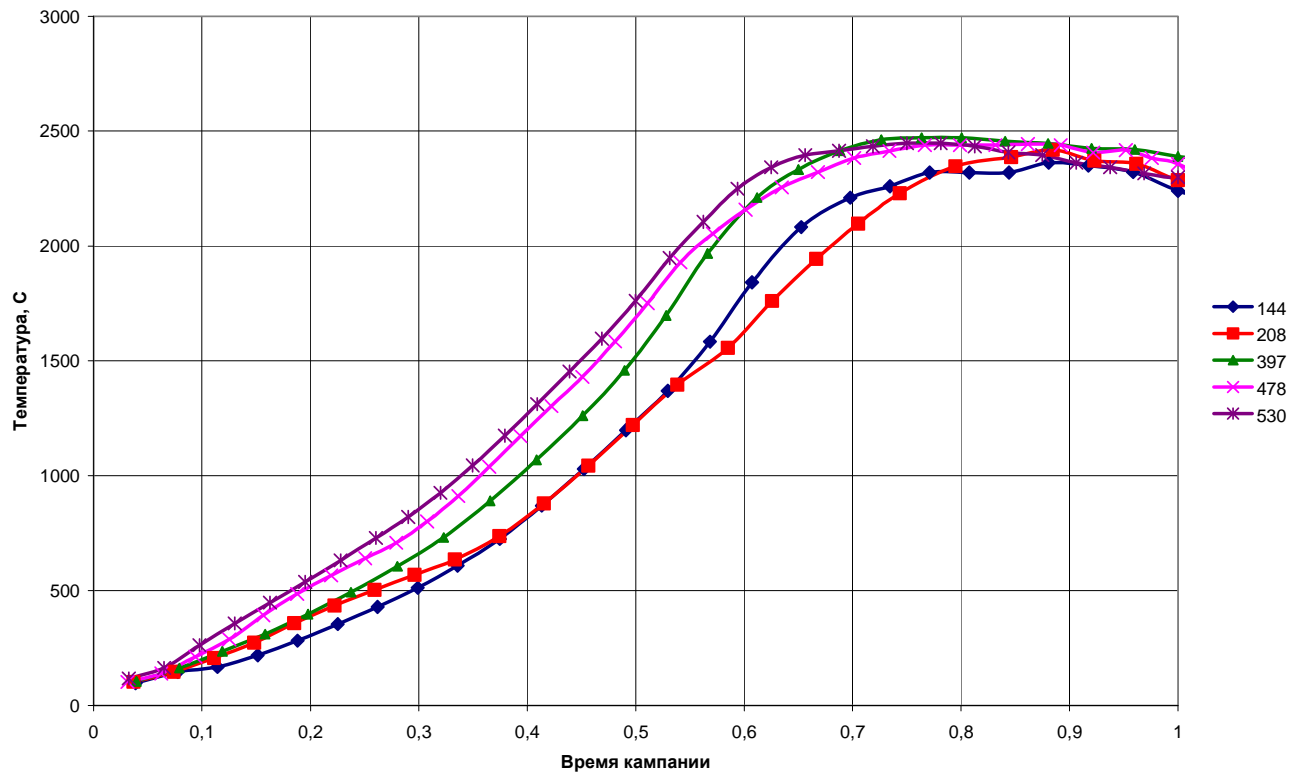
а).

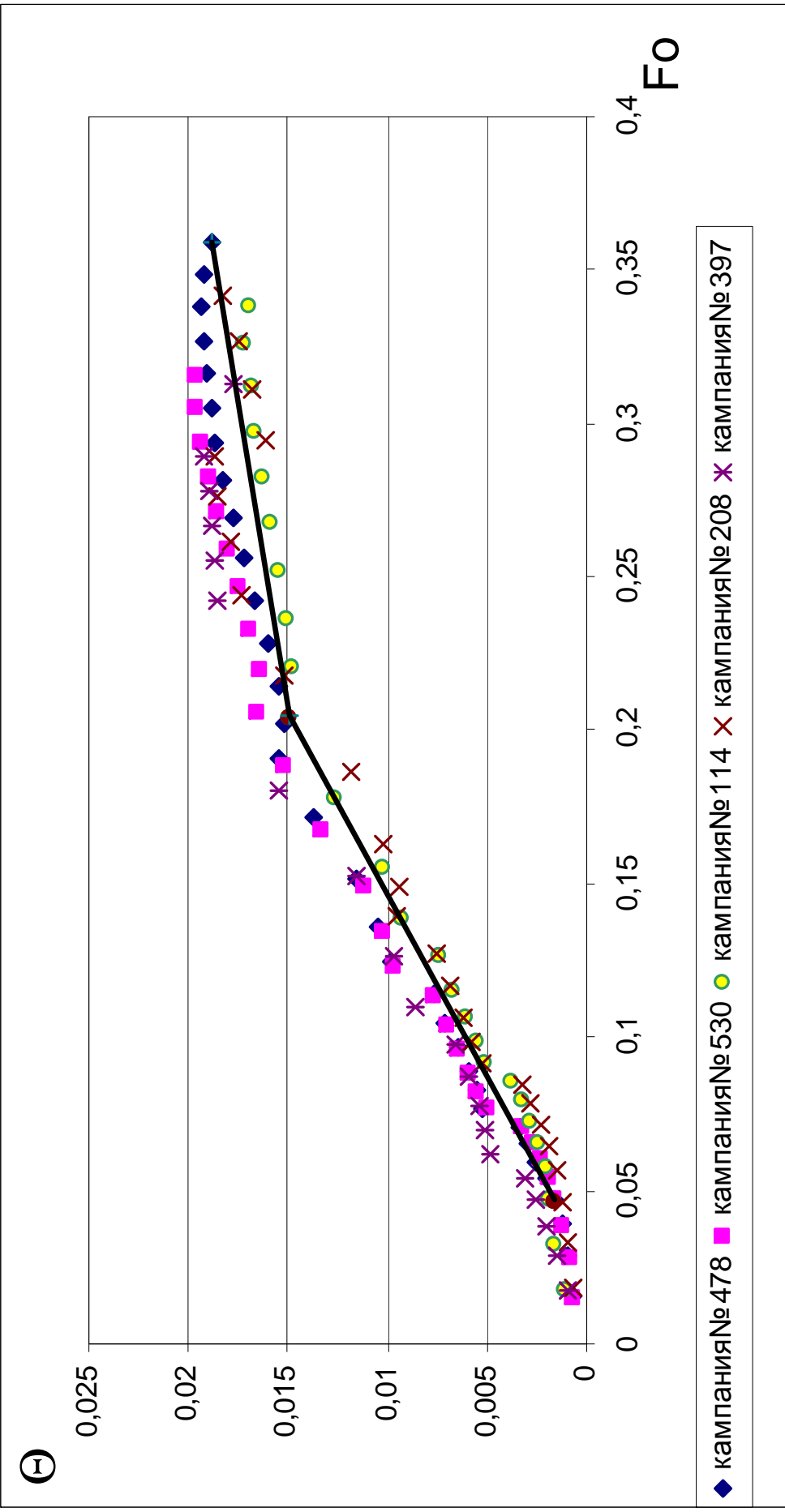


б).









УДК 621.3.035.2:536.5

ПАНОВ Е.Н.¹, КУТУЗОВ С.В.², ЛЕЛЕКА С.В.¹, ШИЛОВИЧ И.Л.¹, БОЖЕНКО М.Ф.¹

¹ *Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»*

² *Открытое акционерное общество «Украинский графит»*

БЕЗРАЗМЕРНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ КЕРНА В П-ОБРАЗНЫХ ПЕЧАХ ГРАФИТАЦИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Введение

Завершающим технологическим переделом при производстве углиграфитовых 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 совершенствованием технологии 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 одевали двухканальную алундовую соломку, горячий спай термопары сваривали в среде гелия, после чего термопару помещали в мулито-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 кремнеземистой 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.2 – 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

Следует отметить, что при настройке численной модели одним из наиболее важных этапов является задание условий однозначности и теплофизических свойств материалов. Данные по теплофизическим свойствам материалов, используемых в технологическом процессе представлены в литературе в ограниченном количестве, особенно при температурах выше (500...800)°С. Поэтому полученные экспериментальные температурные поля имеют важное значение при проверке результатов численного моделирования.

Численные расчеты проводили на персональной ЭВМ с использованием специально разработанного в НТУУ «КПИ» программного обеспечения применительно к печам графитации постоянного тока, 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.

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 удельным электрическим сопротивлением (УЭС) крновой пересыпок этих же кампаний.

На рис.3 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 кампаний (относительное время – отношение текущего времени к максимальному для соответствующей кампании).

Обобщение результатов эксперимента и численных расчетов в безразмерной форме

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°C 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 безразмерных уравнений, с помощью которых можно было бы оперативно определять текущую температуру заготовок в зависимости от времени, технологических и режимных параметров, а также теплофизических свойств материалов заготовок. Подобный подход использовали авторы работ [13,14] при исследовании процессов обжига подин алюминиевых электролизеров, представляющих собой монолитные устройства из угольных блоков, пространство между которыми заполнено набивной подовой массой.

Итак, для нестационарного режима нагрева тел, что имеет место в печах графитации, безразмерная средняя температура заготовок в кернах Θ зависит от безразмерного времени (числа Фурье Fo).

Некоторая условная безразмерная температура для любого момента времени с начала подвода мощности, не считая периода, когда идет испарение влаги из пересыпки и температура остается практически постоянной, определяется из соотношения

$$\Theta = \frac{t_{\tau} \ell_o \Delta \tau \lambda}{1000 P_{\tau}}, \quad (1)$$

где t_{τ} - текущая среднеобъемная температура заготовок в кернах, °C; ℓ_o - определяющий размер, м; $\Delta \tau$ - время с начала процесса графитации, ч; λ – теплопроводность заготовок, Вт / (м·К); P_{τ} - подведенное к кернах печи количество электроэнергии для данного промежутка времени, кВт·ч.

Безразмерное время – число Фурье

$$Fo = \frac{\rho \Delta \tau}{c \ell_o^2} 3600, \quad (2)$$

где c – удельная массовая теплоемкость, Дж / (кг·К), ρ – плотность, кг / м³, материала заготовок.

За определяющий размер принимали эквивалентный диаметр керна, т.е.

$$\ell_o = \frac{4f}{u} = \frac{4Hb}{2(H+b)} = \frac{2Hb}{(H+b)} \quad (3)$$

где f – площадь поперечного сечения керна, м²; u – токопроводящий периметр керна, м; H и b – высота и ширина керна соответственно, м.

Теплофизические свойства материала заготовок при различных температурах принимали по литературным данным.

Рассчитанные по формулам (1) и (2) безразмерные числа Θ и Fo при использовании полученных на основании математического моделирования средних температур керна, теплофизических свойств заготовок в зависимости от температуры, количества подведенной к керну печи электроэнергии P_τ для выбранных промежутков времени $\Delta \tau$ для П – образных печей постоянного тока при графитации электродов большого диаметра представлены на рис. 5 в виде зависимости $\Theta = f(Fo)$. При последующей аппроксимации получены следующие обобщенные уравнения для расчета средних температур керна:

- в первой области

$$\Theta = -0,0024 + 0,0847Fo \quad (4)$$

- во второй области

$$\Theta = 0,0097 + 0,0255Fo \quad (5)$$

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 Θ при увеличении числа Fo .

Точку пересечения двух прямых, представленных уравнениями (4) и (5), 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 $t_{гр} = 2100$ °С. При дальнейшем повышении температуры процесс графитации заготовок продолжается, а заканчивается при температурах 2500 – 3000°С.

Для практического пользования полученными уравнениями (4) и (5) необходимо знать геометрические размеры керна в продольном сечении, а в процессе графитации через каждый

час фиксировать затраты подводимой электроэнергии (P_{τ} , кВт·ч).

Расчет средних температур заготовок в керне производится в следующей последовательности:

1. Для заданного промежутка времени $\Delta\tau$, ч, оценивается ориентировочная средняя температура заготовок, по которой определяется их средняя теплопроводность λ , Вт/(м·К), и средняя объемная теплоемкость $c\rho$, Дж/(м³·К), а затем по формуле (2) вычисляется число Фурье Fo .

2. При известных параметрах загрузки по формуле (3) вычисляется определяющий размер ℓ_o , м.

3. По зависимости (4) или (5) вычисляется безразмерная средняя температура заготовок в керне Θ .

4. Из соотношения (1) определяется действительная средняя температура заготовок в керне для заданного промежутка времени

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

5. Для найденной действительной температуры в последовательности, описанной выше, уточняются величины λ , $c\rho$, Fo , Θ и окончательное значение действительной температуры t_{τ} .

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 безразмерные уравнения для расчета средних температур заготовок в керне для любого момента времени в зависимости от теплофизических свойств материалов, технологических и режимных параметров процесса графитации.

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

Библиографический список

1. Веселовский В.С. Угольные и графитные конструкционные материалы. – М.: Наука, 1966. – 227с.

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. Кваца // 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», №1, 2001-2003. С.14-15.
13. Панов Е.Н., Васильченко Г.Н., Даниленко С.В., Карвацкий А.Я., Шилович И.Л., Боженко М.Ф. Тепловые процессы в электролизерах и миксерах алюминиевого производства / Под общ. ред. Б.С. Громова. – М.: Издательский дом «Руда и металлы», 1998. – 256 с.
14. Обжиг и пуск алюминиевых электролизеров / Б.С. Громов, Е.Н. Панов, М.Ф. Боженко, Г.Н. Васильченко, А.Я. Карвацкий, И.Л. Шилович; Под общ. ред. Б.С. Громова. – М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2001. – 336 с.

Авторы:

Панов Е.Н.
Кутузов С.В.
Лелека С.В.
Шилович И.Л.
Боженко М.Ф.

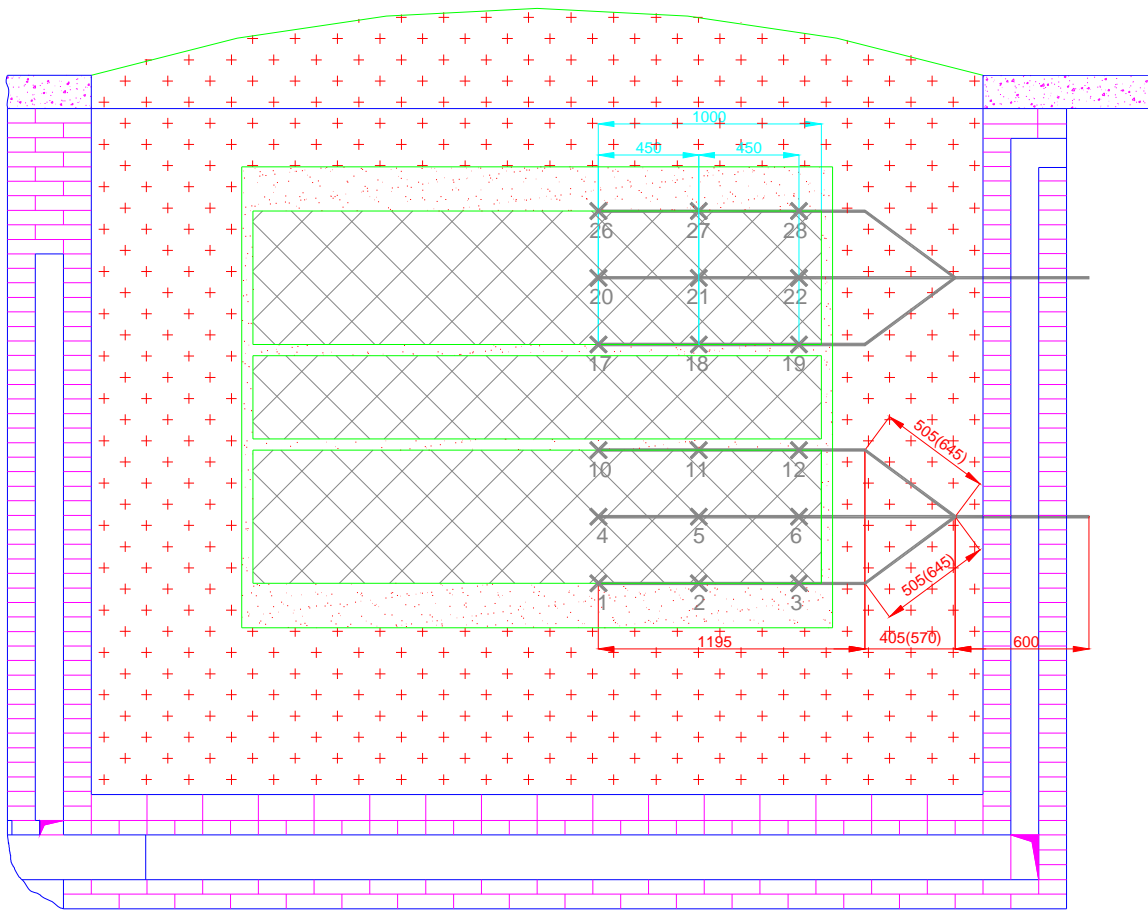
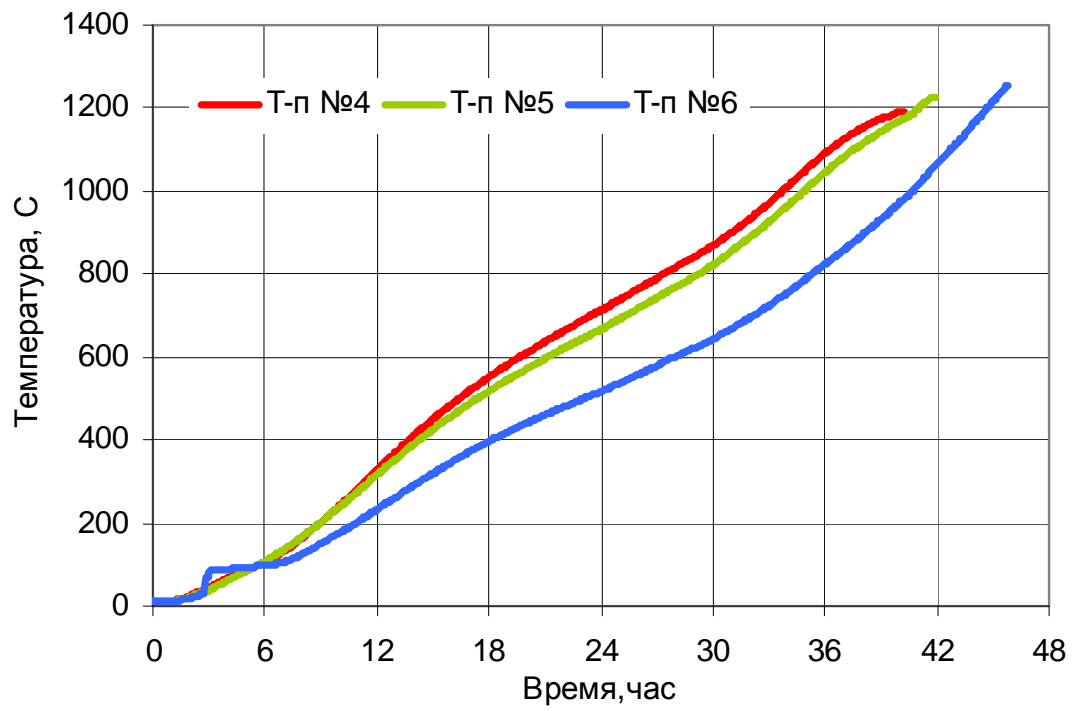


Рис.1. Схема установки термопар в среднем сечении печи №27
(кампания 478)

К статье Панова Е.Н., Кутузова С.В. и др.

«Безразмерные уравнения для определения температурных полей керна в
П-образных печах графитации постоянного тока»

а).



б).

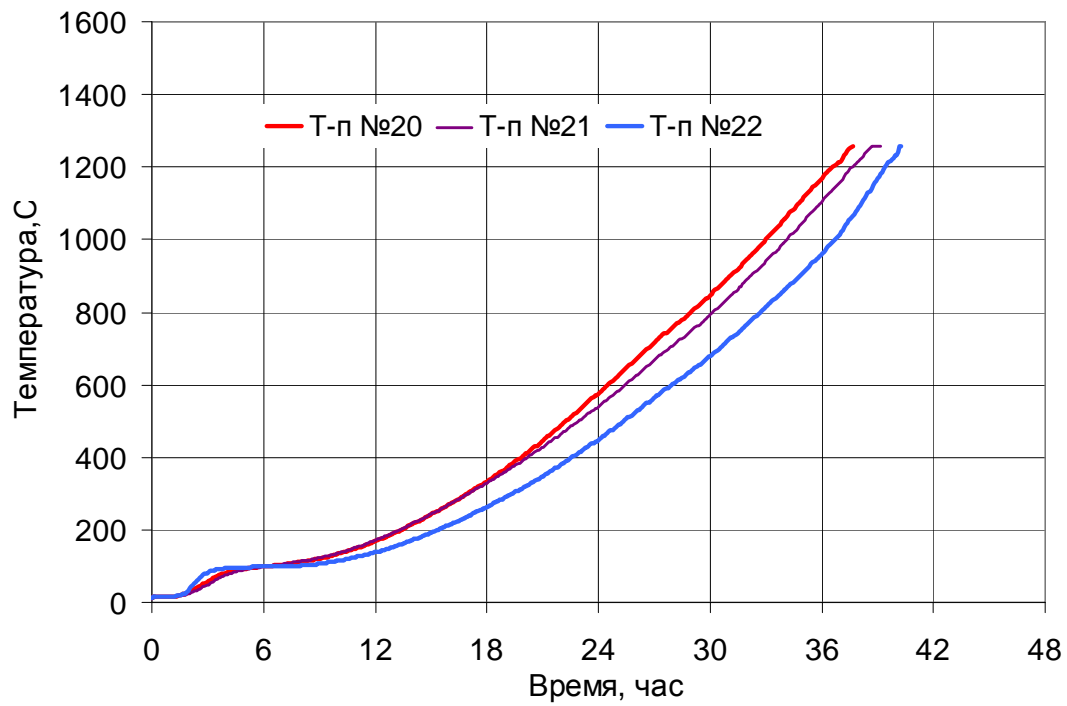


Рис.2. Экспериментальные значения температур внутри заготовок по оси:

а). 1 ряда; б). 3 ряда

К статье Панова Е.Н., Кутузова С.В. и др.

«Безразмерные уравнения для определения температурных полей керна в П-образных печах графитации постоянного тока»

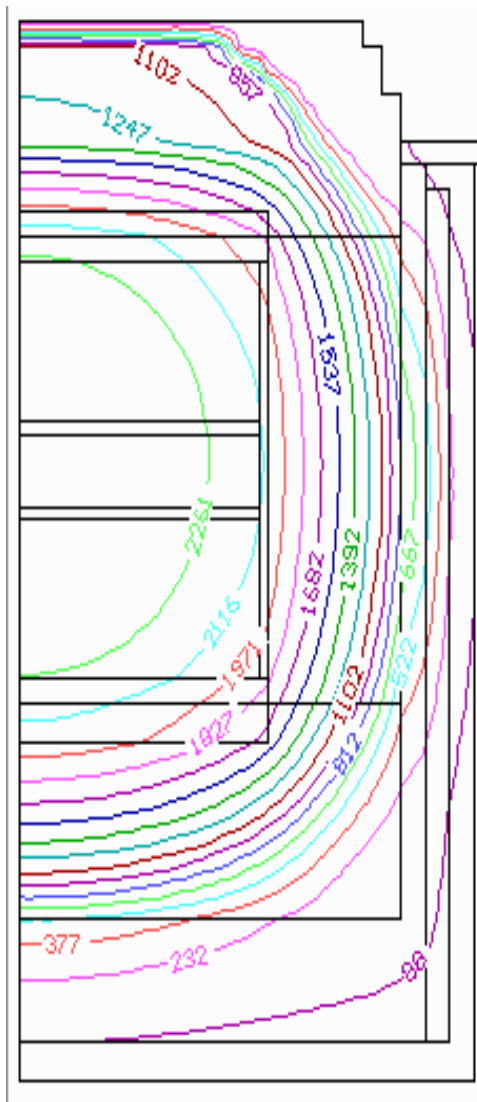


Рис.3. Расчетное температурное поле в поперечном сечении печи №27 (кампания 478) на момент максимальных значений температуры в заготовках (72 ч)

К статье Панова Е.Н., Кутузова С.В. и др.

«Безразмерные уравнения для определения температурных полей керна в П-образных печах графитации постоянного тока»

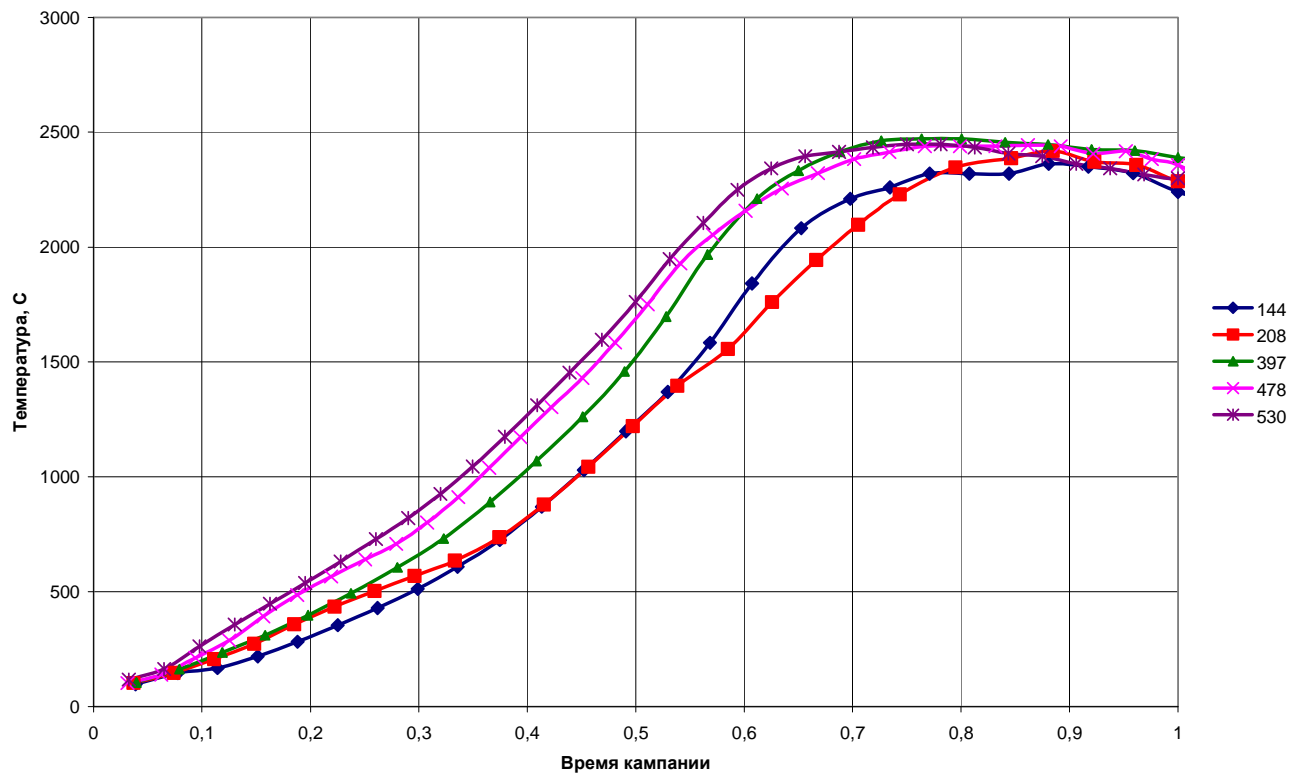


Рис.4. Зависимости средних температур заготовок в керне от относительного времени кампании

К статье Панова Е.Н., Кутузова С.В. и др.

«Безразмерные уравнения для определения температурных полей керна в П-образных печах графитации постоянного тока»

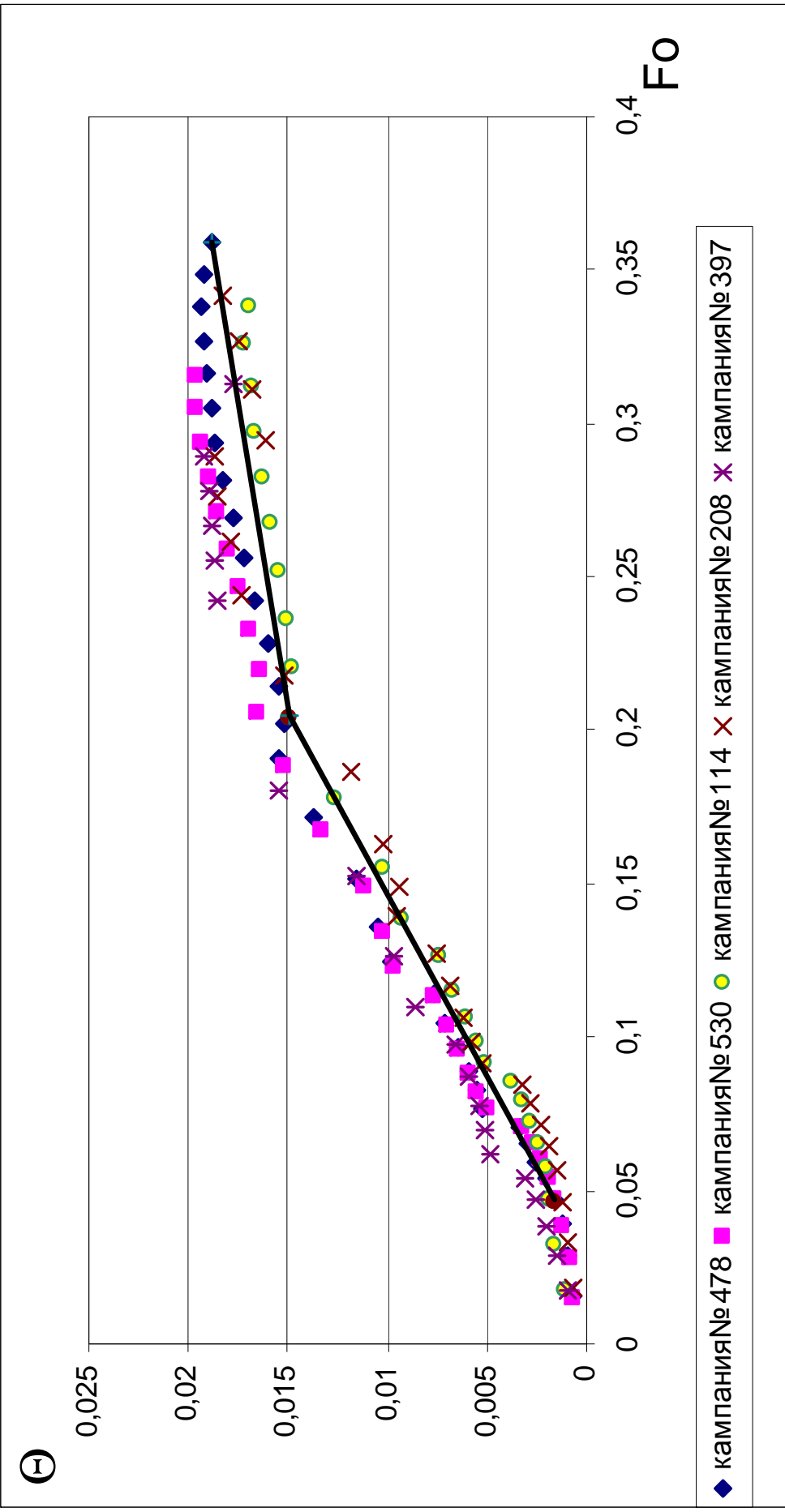


Рис.5. Зависимость безразмерной температуры заготовок в керне Θ от числа Фурье Fo

К статье Панова Е.Н., Кутузова С.В. и др.

«Безразмерные уравнения для определения температурных полей керна в П-образных печах графитации постоянного тока»

