

УДК 621.365.32:621.3.024

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

## **ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕЧЕЙ ГРАФИТАЦИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

### **АННОТАЦИЯ**

Приведены результаты определения основных показателей энергетической эффективности П-образных печей графитации постоянного тока – удельных расходов подводимой электроэнергии и доли аккумулированной заготовками теплоты при их нагреве. Дано распределение потерь подводимой к печи графитации энергии по отдельным статьям, наиболее весомый вклад в которые вносят нагрев пересыпочно-теплоизоляционных материалов, потери с уходящими газами и нагрев конструкционных материалов печи.

Рис. 1, табл. 4, библиогр. 5 наим.

*Возвращена в редакцию после исправления замечаний рецензента 13.12.06  
(будет опубликована в №2 за 2006 г.)*

## ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕЧЕЙ ГРАФИТАЦИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Процесс графитации электродных заготовок в промышленности осуществляется в электрических однофазных печах сопротивления периодического действия по двум технологиям: Ачесона и Кастнера. Сопротивлением служат графитируемые материалы, через которые протекает электрический ток, нагревая их. При этом в малых объемах печи можно сконцентрировать большие количества энергии, выделяющейся при прохождении электрического тока, что позволяет создавать температуры до 3000 °С [1-5].

На ОАО «Укрграфит» графитацию электродных заготовок проводят в нормальных прямых и П-образных печах по технологии Ачесона. Нормальные печи работают на переменном и постоянном токе, а П-образные – только на постоянном токе.

Основными элементами конструкции печей являются две торцевые стенки, соединенные между собой основанием, которое является подиной печи. Расстояние между электродами (в нормальной печи) и между электродами и соединительным проводником (в П – образной печи) является рабочим объемом печи, который загружается графитируемыми изделиями. Загруженный объем графитировочной печи называется керном.

Кампания печи графитации включает 3 этапа:

- 1 – загрузка печи;
- 2 – осуществление процесса графитации изделий;
- 3 – охлаждение и разгрузка печи.

При загрузке печи вначале на подине размещают слой теплоизоляционной шихты, называемую подушкой или постелью, на которую перпендикулярно продольной оси печи укладывают ряд обожженных углеродных заготовок. Заготовки пересыпаются засыпкой, в качестве которой может быть применен каменноугольный кокс, антрацит и др. Аналогично размещаются и следующие ряды заготовок. Графитовые изделия с пересыпкой между ними (кern) со всех сторон окружают слоем теплоизоляционной шихты, в верхней части которой устанавливают газосборный зонтик, служащий для сбора и удаления вредных газов, выделяющихся в процессе нагрева печи.

Главным фактором, определяющим графитацию углеродистого вещества, является конечная температура, которая должна быть не ниже 2500-3000 °С.

Загруженный материал служит активным электрическим сопротивлением в общей цепи агрегата графитации, поэтому он и разогревается в результате непосредственного протекания электрического тока. Следует отметить, что удельное электрическое сопротивление (УЭС) пересыпки примерно в 50-100 раз выше, чем УЭС заготовок. Вследствие этого вся подведенная Джоулева теплота выделяется в слое пересыпки, а нагрев углеродистых заготовок осуществляется теплопроводностью и тепловым излучением от кусочков пересыпки. Таким образом считают, что нагрев собственно заготовок в печах графитации является косвенным.

Технологический процесс графитации определяется графиком мощности, подводимой к печи, которая изменяется во времени. График подвода мощности при нагреве соответствующих заготовок определяется экспериментально, т.е. таким способом регулируют температуру в печи на определенных стадиях процесса графитации изделий. По мере графитации заготовок общее сопротивление печи падает, а по достижению его определенного значения процесс считают законченным и печь отключают.

Охлаждение печи происходит естественным образом в течение нескольких суток. При снижении температуры до величины около 100 °С заготовки выгружают из печи.

Процесс графитации угольных изделий характеризуется значительной энергоемкостью, расход электроэнергии на который превышает 5000 кВт·ч/т. Для последующей выработки энергосберегающих мероприятий в печах графитации, приводящих к снижению расхода электроэнергии, необходимо провести анализ энергопотребления при существующих регламентах подвода мощности и оценить фактическое распределение потерь подводимой к печи энергии при графитации электродов больших диаметров. Практические данные по этим параметрам в отечественной и зарубежной литературе отсутствуют.

Нами были проведены исследования температурно - теплового и технологического режимов 4 кампаний на трех П-образных печах постоянного тока при графитации электродов диаметром 555 и 610 мм.

В процессе исследований экспериментально определяли температуры в заготовках и теплоизоляции, на поверхностях наружных стенок печи, массовые расходы и температуры охлаждающей токоподводы воды, количество подводимой электроэнергии и др. параметры.

Результаты температурных измерений в заготовках и их анализ были предметом отдельной статьи. В настоящей статье обобщены и проанализированы показатели энергетической эффективности исследованных кампаний, к которым отнесены:

- удельный расход подводимой электроэнергии  $\varepsilon$ , кВт·ч/т продукции;
- доля аккумулированной заготовками теплоты  $q_{ак}$ .

Удельный расход электроэнергии (см. табл.1) определяли из соотношения

$$\varepsilon = Q_{общ} / M_з, \quad (1)$$

где  $Q_{общ}$  – общее количество подведенной электроэнергии за всю кампанию печи, кВт·ч;  $M_з$  – масса загруженных заготовок, т.

Таблица 1

Результаты расчетов величины  $\varepsilon$

Номер кампании	$\tau$ , ч	$Q_{общ}$ , кВт·ч	$M_з$ , т	$\varepsilon$ , кВт·ч/т
208	78	408919	70,5	5800
397	72	430842	74,5	5783
478	99	533237	82,8	6440
530	87	489599	79,4	6166

Помимо сведений, приведенных в табл. 1, исследованные кампании отличались диаметром загружаемых электродов и графиком подвода мощности. Так в кампаниях 208 и 397 осуществляли графитацию электродов диаметром 555 мм, а в кампаниях 478 и 530 – 610 мм. В кампании 208, например, подвод

мощности осуществляли по типовому регламенту (начальное значение 1500 кВт, затем производили увеличение подводимой мощности: на 100 кВт/ч до 3000 кВт, на 150 кВт/ч до 5000 кВт, на 400 кВт/ч - до достижения максимума; после чего осуществляли соответствующее снижение мощности до определенного предела. В кампании 397 по сравнению с кампанией 208 применили интенсифицированный подвод мощности на некоторых этапах, что позволило при практически одинаковых удельных расходах электроэнергии сократить длительность процесса графитации в кампании 397 на 6 ч. Аналогичная картина наблюдалась и в кампании 530, где за счет интенсификации подвода мощности по сравнению с кампанией 478 (графитация электродов одного диаметра) длительность процесса сокращена на 12 ч.

Доля аккумулированной заготовками теплоты (относительные полезные затраты подведенной электрической энергии) определяли из соотношения

$$q_{ак} = Q_{ак} / Q_{подв}, \quad (2)$$

где  $Q_{ак}$  – количество теплоты, аккумулированной заготовками за соответствующий период времени с начала подвода мощности, кДж;  $Q_{подв}$  – количество подведенной теплоты при нагреве заготовок для этого же периода времени, кДж.

Количество аккумулированной заготовками теплоты, кДж

$$Q_{ак} = M_3 c (t_{\tau} - t_0), \quad (3)$$

где  $M_3$  - масса заготовок, кг;  $c$  – удельная массовая теплоемкость, кДж / (кг·К);  $t_{\tau}$  и  $t_0$  - средняя текущая и начальная температуры заготовок соответственно, °С.

Количество подведенной теплоты, кДж

$$Q_{подв} = 3600 P_{\tau}, \quad (4)$$

где  $P_{\tau}$  – количество подведенной электроэнергии, кВт·ч.

Рассчитанные по формуле (2) величины  $q_{ак}$  при использовании формул (3) и (4) для определения величин  $Q_{ак}$  и  $Q_{подв}$ , с учетом массы заготовок (табл.1), экспериментальных значений средних температур заготовок в керне  $t_{\tau}$  и количества подводимой электроэнергии  $P_{\tau}$ , литературных значений удельной массовой теплоемкости  $c$  для выбранных промежутков времени 4-х кампаний графитации электродов в П – образных печах постоянного тока представлены на

рис.1 в виде зависимости  $q_{ак} = f\left(\frac{\tau}{\tau_{max}}\right)$ , где  $\tau$  – текущее время, ч;  $\tau_{max}$  –

максимальное время, характеризующее подвод мощности для соответствующей кампании, ч. Т. к. экспериментальные исследования на всех кампаниях проводили в осенне-весенний период года при практически одинаковых температурах загрузки, то входящая в формулу (3) величина  $t_0$  при расчете  $Q_{ак}$  не учитывалась.

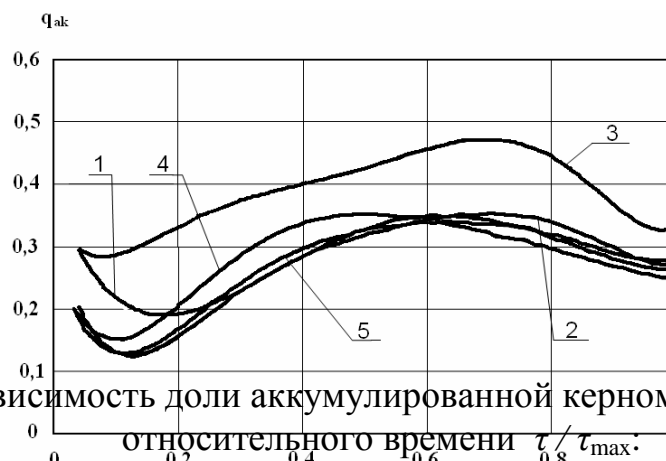


Рис.1. Зависимость доли аккумулярованной в ядре теплоты  $q_{ак}$  от относительного времени  $\tau/\tau_{max}$ .  
 1-камп.114; 2-камп.208; 3-камп.397; 4-камп.478; 5-камп.530.

Анализ представленных данных показывает, что во всех кампаниях при нагреве электродов можно выделить три характерные области:

I. В начальный период величина  $q_{ак} = 0,2...0,3$ , затем с течением времени происходит ее уменьшение до  $0,12...0,29$ . Это связано с тем, что увеличивается часть подводимой теплоты, которая затрачивается на испарение влаги из пересыпки и теплоизоляции.

II. После испарения влаги происходит некоторый рост величины  $q_{ак}$  до значений  $0,32...0,47$ . Максимальные значения доли аккумулярованной теплоты характерны в некоторых кампаниях для максимальных достигнутых температур, либо для максимальных значений подводимой мощности;

III. Последний этап характеризуется снижением величины  $q_{ак}$  до  $0,25...0,32$  на конец кампании. На этом этапе подводимая энергия в основном расходуется на компенсацию потерь в окружающую среду.

Сопоставление доли аккумулярованной теплоты для различных кампаний показывает, что при интенсифицированном графике подвода мощности (кампания 397) абсолютные значения доли аккумулярованной теплоты выше, чем у других кампаний примерно на 25 – 30 %. Применение установленных в период загрузки печи деревянных щитов для разделения зоны испарения влаги (кампания 478) способствовало росту температурного перепада и термического сопротивления теплопереносу из тепловыделяющей зоны, что привело к повышению доли аккумулярованной теплоты примерно на 10 – 15%.

Если из общего количества подведенной энергии, принятого за относительную единицу, вычесть долю аккумулярованной заготовками теплоты, то получим относительную величину потерь теплоты, т.е.  $q_{п} = (1 - q_{ак})$ .

Основными составляющими потерь теплоты в печах графитации являются:

- нагрев пересыпки;
- нагрев постели, боковой и верхней части теплоизоляционной шихты;
- затраты теплоты на испарение влаги из пересыпки и теплоизоляционной шихты;
- нагрев подины, боковых и торцевых стен;
- потери теплоты с уходящими газами;
- потери теплоты с наружных поверхностей ограждений в окружающую среду.

Распределение потерь теплоты по отдельным статьям проведем на примере печи №27 (кампания 478), в процессе экспериментальных исследований на которой измеряли все необходимые для их расчета величины, а теплофизические

свойства материалов определяли по литературным данным при средних температурах на момент отключения печи.

### Расчет

1. Количество теплоты, затрачиваемое на нагрев постели, пересыпки и теплоизоляционной шихты, кДж

$$Q_{ni} = m_i \left(1 - \frac{W_i}{100}\right) c_i (t_{in} - t_{ik}) \quad (5)$$

2. Количество теплоты, аккумулированное конструктивными элементами, кДж

$$Q_{aki} = m_{ki} c_{ki} t_{ki} \quad (6)$$

3. Количество теплоты, затраченное на испарение влаги из материалов постели, пересыпки и теплоизоляционной шихты, кДж

$$Q_{испi} = \frac{W_i}{100} m_i [(t_s - t_{in}) c_w + r], \quad (7)$$

где  $t_s$  – температура насыщения при давлении  $P = 0,1$  МПа (принимаем  $100^\circ\text{C}$ );  $c_w$  – теплоемкость воды, принимаем равной  $4,19$  кДж/(кг·К);  $r$  – теплота фазового перехода при  $P = 0,1$  МПа, равная  $2256,8$  кДж/кг.

Исходные данные к расчету величин  $Q_n$ ,  $Q_{ак}$ ,  $Q_{исп}$  приведены в табл.2.

4. Потери теплоты от внутренней поверхности стен печи к проточному воздуху, кДж

$$Q_{вз} = 3,6 \Sigma \alpha F (t_{ст} - t_{вз}) \tau, \quad (8)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от поверхностей стенки печи к проточному воздуху, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F$  – поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>;  $t_{ст}$  – температура поверхности стенки, °С;  $t_{вз}$  – температура проточного воздуха, °С;  $\tau$  – время с начала подвода мощности, ч.

По конструктивным данным для П – образной печи величина  $F = 480$  м<sup>2</sup>, коэффициент теплоотдачи при скоростях движения воздуха  $2...4$  м/с (на основании практических измерений) по оценочным расчетам равен  $15,6$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), а температура поверхности стенки (при принятой величине  $t_{вз} = 0$  °С) изменяется по следующей зависимости:  $t(\tau) = 113 - 76,16\tau + 1,5454\tau^2 - 0,00838\tau^3$  (получена на основании обобщения результатов экспериментальных измерений).

5. Потери теплоты с уходящими газами, кДж

$$Q_{yx} = \Sigma G_{yx} h_{yx} \tau, \quad (9)$$

где  $G_{yx}$  – массовый расход уходящих газов, кг/с;  $h_{yx}$  – энтальпия уходящих газов при их соответствующей температуре, кДж/кг.

$$G_{yx} = \nu F \rho, \quad (10)$$

где  $\nu$  – скорость, м/с;  $F$  – площадь поверхности для прохода газов через верх печи, м<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность уходящих газов, кг/м<sup>3</sup>.

Оценочная величина  $\nu = 0,15$  м/с; из конструктивных размеров верха печи, а также с учетом переменной площади для удаления газов вследствие нестационарного температурного режима, усредненное значение  $F = 61,25$  м<sup>2</sup>.

Результаты расчетов входящих в формулы (9), (10) величин и текущих

## Исходные данные к расчету

Наименование величины	Обозначение	Единица	Значение величины
1. Масса постели	$m_{п}$	кг	63366
2. Начальная влажность материала постели	$W_{п}$	%	18
3. Начальная температура постели	$t_{пн}$	$^{\circ}\text{C}$	7
4. Средняя конечная температура постели	$t_{пк}$	$^{\circ}\text{C}$	1550
5. Теплоемкость материала постели	$c_{п}$	кДж/(кг·К)	1,523
6. Масса пересыпки	$m_{з}$	кг	11840
7. Начальная влажность материала пересыпки	$W_{з}$	%	18
8. Начальная температура пересыпки	$t_{зн}$	$^{\circ}\text{C}$	7
9. Средняя конечная температура пересыпки	$t_{зк}$	$^{\circ}\text{C}$	2357
10. Теплоемкость материала пересыпки	$c_{з}$	кДж/(кг·К)	1,85
11. Масса теплоизоляционной шихты: бокового слоя верхнего слоя	$m_{ш}$	кг	47172 20216
12. Начальная влажность материала шихты	$W_{ш}$	%	18
13. Начальная температура шихты	$t_{шн}$	$^{\circ}\text{C}$	7
14. Средняя конечная температура шихты бокового слоя верхнего слоя	$t_{шк}$	$^{\circ}\text{C}$	1750 1625
15. Теплоемкость материала шихты	$c_{ш}$	кДж/(кг·К)	1,523
16. (Масса /температура) шамотной футеровки внутренней боковой стены внешней боковой стены торцевой передней стены торцевой глухой стены	$m_{ф} / t_{ф}$	кг / $^{\circ}\text{C}$	35150/780 35150/44 8984/150 8984/150
17. Теплоемкость шамотной футеровки	$c_{ф}$	кДж/(кг·К)	0,870
18. (Масса/температура) графитовых блоков токоподводов торца токоподводящего торца верхнего торца глухого	$m_{гр} / t_{гр}$	кг / $^{\circ}\text{C}$	9180/2500 1528/2400 2081/1622 7065/2105
19. Теплоемкость графитовых блоков	$c_{гр}$	кДж/(кг·К)	2,048
20. (Масса/температура) углеграфитовых блоков торца токоподводящего вверху торца токоподводящего внизу торца глухого	$m_{уг} / t_{уг}$	кг / $^{\circ}\text{C}$	4696/1810 4800/1420 11250/1615
21. Теплоемкость углеграфитовых блоков	$c_{уг}$	кДж/(кг·К)	1,640
22. (Масса/температура) графитовой засыпки торца токоподводящего торца глухого лицевого торца глухого тыльного	$m_{зг} / t_{зг}$	кг / $^{\circ}\text{C}$	4086/1270 17546/1270 19960/920
23. Теплоемкость графитовой засыпки	$c_{зг}$	кДж/(кг·К)	1,854

значений  $Q_{ухi}$  для принятого времени газовыделения 0...50 ч приведены в табл. 3.

6. Потери теплоты с водой, охлаждающей токоподводящие электроды, кДж

$$Q_{г} = 3600G_{г}c_{г}(t_{2} - t_{1})\tau, \quad (11)$$

Таблица 3

Текущие значения теплотерь с уходящими газами

$\tau, \text{ч}$	$h_{\text{ух}}, \text{кДж/кг}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$G_{\text{ух}}, \text{кг/с}$	$Q_{\text{ух}i} \cdot 10^{-7}, \text{кДж}$
0	145,6	0,80	7,350	0
10	187,6	0,75	6,891	4,654
10	248,1	0,70	6,431	5,744
10	356,0	0,65	5,972	7,654
10	446,2	0,60	5,512	8,855

где  $G_{\text{в}}$  – расход воды на охлаждение токоподводов, кг/с;  $c_{\text{в}}$  – удельная массовая теплоемкость воды, кДж/(кг·К);  $t_2$  и  $t_1$  – конечная и начальная температура воды соответственно, °С.

Для охлаждения токоподводов используется по 3 потока воды с каждого торца. Экспериментальные измерения проводили на протяжении всей кампании через каждые 6 ч для одного из потоков, получив при обработке данных следующие усредненные значения:  $G_{\text{в}1} = 0,112$  кг/с;  $t_2 = 45$  °С;  $t_1 = 8$  °С. Теплоемкость воды берем  $c_{\text{в}} = 4,187$  кДж/(кг·К).

Результаты расчетов потерь подводимой к печи графитации теплоты представлены в табл.4.

Таблица 4

Результаты расчетов потерь теплоты при графитации электродов

Статья потерь теплоты	$Q_i \cdot 10^{-7}, \text{кДж}$	%
1. Нагрев постели	12,21	12,95
2. Нагрев пересыпки	4,22	4,48
3. Нагрев теплоизоляционной шихты, в том числе: бокового слоя верхнего слоя	14,41 10,31 4,1	15,28
4. Аккумулированная теплота конструктивными элементами – ми, в том числе: шамотной футеровкой графитовыми блоками углеграфитовыми блоками графитовой засыпкой	26,01 2,75 9,19 5,57 8,50	27,59
5. Испарение влаги из постели, пересыпки, теплоизоляционной шихты	6,79	7,20
6. К проточному воздуху	0,02	0,02
7. С уходящими газами	26,91	28,54
8. С охлаждающей водой	3,71	3,94
Итого	94,28	100,00

Анализ представленных в табл.4 данных показывает, что наиболее существенными потерями теплоты являются ее затраты на нагрев постели, пересыпки и теплоизоляционной шихты (32,7%), потери теплоты с уходящими газами (28,5%) и затраты на нагрев конструкционных материалов печи (27,6%).

Если уменьшение затрат теплоты на нагрев конструкционных материалов не представляется возможным, то уменьшение потерь теплоты с уходящими газами



и затрат на нагрев теплоизоляционной шихты возможно, что является предметом дальнейших исследований.

### **Выводы**

1. На основании экспериментальных исследований определены основные показатели энергетической эффективности П-образных печей графитации постоянного тока - удельные расходы подводимой электроэнергии на единицу продукции и доля аккумулированной заготовками теплоты.

2. Установлено, что в процессе нагрева заготовок доля аккумулированной теплоты сначала уменьшается (в период испарения влаги из пересыпки и теплоизоляции), затем увеличивается до достижения максимальных температур заготовок или максимальных значений подводимой мощности, и снова уменьшается до конца кампании.

3. В результате расчетов потерь подводимой к печи графитации теплоты получено, что наиболее существенными являются ее затраты на нагрев постели, пересыпки и теплоизоляционной шихты (32,7%); потери с уходящими газами (28,5%) и затраты на нагрев конструкционных материалов печи (27,6%).

### **Литература**

1. Чалых Е.Ф. Оборудование электродных заводов: Учебное пособие для вузов. М.: Металлургия, 1990. – 238с.

2. Чалых Е.Ф. Технология и оборудование электродных и электроугольных предприятий. – М.: Металлургия, 1972. – 432с.

3. Фиалков А.С. Углеграфитовые материалы. – М.: Энергия, 1979. – 320с.

4. Соседов В.П., Чалых Е.Ф., Графитация углеродистых материалов. – М.: Металлургия, 1987. – 187с.

5. Островский В.С., Виргильев Ю.С., Костиков В.И. и др. Искусственный графит. – М.: Металлургия, 1986. – 272с.

### **ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ СТАТТІ**

#### **«ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕЧЕЙ ГРАФИТАЦИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА»**

1. Панов Євген Миколайович, декан ІХФ, зав. кафедри ХПСМ НТУУ «КПІ», д.т.н., професор.

Домашня адреса: 02192, Київ-192, Дарницький бульвар 7, кв. 81.

Телефони : службовий – (044)236-40-52; домашній – (044)543-15-40.

2. Кутузов Сергій Володимирович, генеральний директор ВАТ «Укрграфіт».

Домашня адреса: 69065, Запоріжжя-65, вул. Квітуча 34,б.

Телефони: службовий – (061)289-51-10; домашній – (061)224-81-10.

3. Шилович Ігор Леонідович, доцент кафедри ХПСМ НТУУ «КПІ», к.т.н.

Домашня адреса: 03049, Київ-49, вул. Курська 13, кв. 23.

Телефони: службовий – (044)241-68-61; домашній – (044)245-09-68.

4.Лелека Сергій Володимирович, науковий співробітник НДЦ «Ресурсозберігаючі технології» НТУУ «КПІ».

Домашня адреса: Черкаська обл., м. Золотоноша, вул. Благовіщенська, 84.

Телефони: службовий – (044)241-86-09.

5.Боженко Михайло Федорович, доцент кафедри ТПТ НТУУ «КПІ», к.т.н.

Домашня адреса: 03056, Київ-56, Проспект Перемоги 37, буд.4, кв. 14.

Телефони: службовий - (044)241-68-61; домашній – (044)489 -16-77.

Редакції журналу  
«Енергетика»

---

03056, Київ-56, Проспект Перемоги 37,  
Національний технічний університет  
України «КПІ»

Повертаємо для опублікування в науковому журналі «Енергетика: економіка, технології, екологія» статтю Панова Є.М., Кутузова С.М., Шиловича І.Л., Лелеки С.В., Боженка М.Ф. «Оценка энергетической эффективности печей графитации постоянного тока», виправлену у відповідності з зауваженнями рецензента.

Так, згідно з зауваженням 1, виокремлене формулювання мети статті (стор.2, останній абзац).

Зауваження 2 – Розкрито, які матеріали є опором у печі (стор.2).

Зауваження 3 – Наведена енергетична характеристика кампаній, зроблений аналіз енергетичних показників (стор.3,4).

Зауваження 4 – В позначеннях після формул (1) і (2) більш детально розшифровані величини  $Q_{\text{подв}}$  і  $Q_{\text{общ}}$ .

Зауваження 5 – В формулу (3) введена початкова температура заготовок  $t_0$ , надані коментарі щодо її урахування (стор.5).

Зауваження 6 – Позначення  $q_3$  змінене на  $\varepsilon$  – формула (1), табл.1.

Зауваження 7 – Стосовно того, чому  $q_{ак}$  не дорівнює нулю при  $\tau = 0$ :

Величина  $q_{ак}$  характеризує, яка частка підведеної теплоти (енергії) акумулюється заготовками для відповідного терміну з початку підведення енергії. При  $\tau = 0$  енергія в піч не підводиться, тому у цьому випадку  $q_{ак}$  втрачає свою фізичну сутність.

Зауваження 8 – Більш детально дана характеристика матеріалів, що завантажуються у піч, у тому числі і так звана «постель» (стор.1,2).

Зауваження 9 – Стосовно відмінності температур графітових блоків і графітової засипки (п.п. 18 і 22 у табл. 2):

З табл. 2 видно, що маса, наприклад, графітової засипки і графітових блоків торця токопідводящого відрізняється приблизно у 2,7 рази, а якщо врахувати їх щільність, то об'єми цих матеріалів відрізняються більше як у 3,5 рази. Біля блоків температура засипки буде дорівнювати біля 2400 °С, а біля капітальної шамотної стінки – біля 780 °С (див. п.16). Таким чином середньооб'ємні температури будуть відповідати тим значенням, які наведені у табл.2.

Зауваження 10 – Визначення «электрическая печь» вилучене з тексту статті (вилучений абзац 2 на стор.1).

За дорученням колективу авторів, з повагою:

Боженко М.Ф.

Шилович І.Л.