

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°C [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, называемой 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 (кери) со всех сторон окружают слоем теплоизоляционной шихты, в верхней части которой устанавливают газосборный зонт, 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°C.

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, подводимой к печи мощности, 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°C 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 ε , кВт·ч/т продукции;
- доля аккумулированной заготовками теплоты $q_{ак}$.

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

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

где $Q_{общ}$ - общее количество подведенной электроэнергии за всю кампанию печи, кВт·ч;

M_z - масса загруженных заготовок, т.

Таблица 1

Результаты расчетов величины ε

Номер кампании	τ , ч	$Q_{общ}$, кВт·ч	M_z , т	ε , 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 увеличивали подводимую мощность: по 100кВт/ч до 3000 кВт, по 150 кВт/ч до 5000 кВт, по 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.

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

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

где $Q_{ак}$ - количество теплоты, аккумулированной заготовками за соответствующий период времени с начала подвода мощности, кДж;

$Q_{подл}$ - количество подведенной теплоты при нагреве заготовок для этого же периода времени, кДж.

Количество аккумулированной заготовками теплоты, кДж

$$Q_{ак} = M_z c (t_f - t_0), \quad (3)$$

где M_z - масса заготовок, кг;

c - удельная массовая теплоемкость, кДж / (кг·К);

t_f и t_0 - средняя текущая и начальная температуры заготовок соответственно, °С.

Количество подведенной теплоты, кДж:

$$Q_{подл} = 3600 P_t \tau, \quad (4)$$

где P_t - количество подведенной электроэнергии, кВт·ч.

Рассчитанные по формуле (2) величины $q_{ак}$ при использовании формул (3) и (4) для определения величин $Q_{ак}$ и $Q_{подл}$, с учетом

массы заготовок (табл.1), экспериментальных значений средних температур заготовок в керне t_k и количества подводимой электроэнергии P_{Σ} , 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

$$q_{ак} = f\left(\frac{\tau}{\tau_{max}}\right), \text{ где } \tau - \text{текущее время, ч; } \tau_{max} -$$

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.

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 аккумулированной 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 аккумулированной теплоты для различных кампаний показывает, что при интенсифицированном графике подвода мощности (кампания 397) абсолютные значения доли аккумулированной 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 аккумулированной теплоты примерно на $10...15\%$.

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

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.

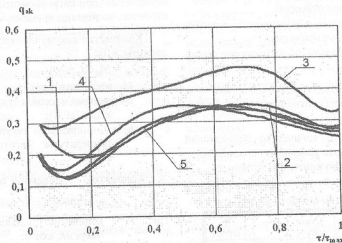


Рис.1. Зависимость доли аккумулированной керна теплоты $q_{ак}$ от относительного времени τ/τ_{max} :

1-камп.114; 2-камп.208; 3-камп.397; 4-камп.478; 5-камп.530.

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:

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

2. Количество теплоты, аккумулированное конструктивными элементами, кДж:

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

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

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

где t_s - температура насыщения при давлении $P = 0,1$ МПа (принимаем 100°C);

c_a - 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 $Q_{шт}$, $Q_{акт}$, $Q_{испв}$ приведены в табл.2.

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

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

где α - коэффициент теплоотдачи от поверхностей стенки печи к проточному воздуху, Вт/(м²·К);

F - поверхность теплообмена, м²;

$t_{ст}$ - температура поверхности стенки, °С;

t_{cm} - температура проточного воздуха, °С;

τ - время с начала подвода мощности, ч.

По конструктивным данным для П - образной печи величина $F = 480$ м², коэффициент теплоотдачи при скоростях движения воздуха $2...4$ м/с (на основании практических измерений) по оценочным расчетам равен $15,6$ Вт/(м²·К), а температура поверхности стенки (при принятой величине $t_{ст} = 0^\circ\text{C}$) 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:

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

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

$$G_{гх} = v F \rho, \quad (10)$$

где v - скорость, м/с;

F - площадь поверхности для прохода газов через верх печи, м²;

ρ - плотность уходящих газов, кг/м³.

Оценочная величина $v = 0,15$ м/с; из конструктивных размеров верха печи, а также с учетом переменной площади для удаления газов вследствие нестационарного температурного режима, усредненное значение $F = 61,25$ м².

Результаты расчетов входящих в формулы (9), (10) величин и текущих значений $Q_{гх}$ для принятого времени газовой выделенной $0...50$ ч приведены в табл. 3.

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

$$Q_w = 3600 G_w c_w (t_2 - t_1) \tau, \quad (11)$$

где G_w - расход воды на охлаждение токоподводов, кг/с;

c_w - 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: $G_{w1} = 0,112$ кг/с; $t_2 = 45^\circ\text{C}$; $t_1 = 8^\circ\text{C}$. Теплоемкость воды берем $c_w = 4,187$ кДж/(кг·К).

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

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.

Таблица 2

Исходные данные к расчету

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

Таблица 3

Текущие значения теплопотерь с уходящими газами

$\tau, ч$	h_{yx} кДж/кг	ρ_s кг/м ³	G_{yx} кг/с	$Q_{yx} \cdot 10^3$ 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

Таблица 4

Результаты расчетов потерь теплоты при графитации электродов

Статья потерь теплоты	$Q_i \cdot 10^{-7}$, 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 конструкционными элементами, 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

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.: Metallургия, 1990. - 238с.
2. Чалых Е.Ф. Технология и оборудование электродных и электроугольных предприятий. - М.: Metallургия, 1972. - 432с.
3. Фиалков А.С. Углеграфитовые материалы. - М.: Энергия, 1979. - 320с.
4. Соседов В.П., Чалых Е.Ф., Графитация углеродистых материалов.- М.: Metallургия, 1987. - 187с.
5. Островский В.С., Виргильев Ю.С., Костиков В.И. и др. Искусственный графит. - М.: Metallургия, 1986. - 272с.