

ОТНОСНО ЕНЕРГИЙНАТА ЕФЕКТИВНОСТ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ПЕЩИ РАБОТЕЩИ С НАМАЛЕН БРОЙ НАГРЕВАТЕЛИ

Стефан Чобанов¹, Кирил Джустров², Менто Ментешев³

¹ СМС-С ЕООД, Пупдон e-mail: stefan.chobanov@cmc-c.com

² Минно-геоложки университет "Св. Ив. Рилски", 1700 София e-mail: justrov@mgu.bg

³ СМС-С ЕООД, Пупдон e-mail: mento.menteshev@cmc-c.com

РЕЗЮМЕ: В статията е анализирана енергийната ефективност на електрически пещи, работещи с намален брой нагреватели. Направени са теоретичен и теоретично-експериментален анализ на технологичния цикъл на работа на пещите. Теоретично и експериментално е доказана ниската енергийна ефективност при работа с намалена мощност.

REGARDING ELECTRICAL EFFECTIVITY OF ELECTRICAL FURNACES OPERATING WITH REDUCES NUMBER OF HEATERS

Stefan Chobanov¹, Kiril Dzhustrov², Mento Monteshev³

¹ CMC-C Ltd, Pupdon e-mail: stefan.chobanov@cmc-c.com

² University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia e-mail: justrov@mgu.bg

³ CMC-C Ltd, Pupdon e-mail: mento.menteshev@cmc-c.com

ABSTRACT. In this article is analyzed the energy efficiency of electric furnaces, operating with a reduced number of heaters. Theoretical and theoretic-experimental analysis of the technological cycle of operation of the furnace is prepared. Theoretically and experimentally is proved the low energy efficiency when operating with reduced power output

В зависимост от необходимата температура, електрическите пещи могат да изпълняват своите функции и с по-малък брой нагреватели. Най-често това се случва при прекъснати (изгорели) нагреватели, когато с работещите е възможно да се достигне технологично необходимия температурен режим. Но тази възможност се осъществява с цената на повишен разход на електрическа енергия, както по абсолютна стойност така и относително, с нарастването на специфичното потребление на ел. енергия за термичната обработка на технологичния продукт.

Идеята за настоящият анализ възникна при обследване на енергийна ефективност в промишлена система [2], в която се използват пещи и сушилни с електрически нагреватели. Експериментално се доказва, че при работа със 75% от нагревателите, специфичният и абсолютният разход на електрическа енергия са почти с 22% по-високи. При това в процеса на първоначалното загряване за достигане на технологично необходимата температура се изразходва около три пъти повече ел. енергия, а в квазистационарния процес, когато регулаторът поддържа температура в зададен интервал $\theta_{\max} - \theta_{\min}$, разхода на енергия се увеличава с около 11% [2].

Теоретичен анализ

Анализът е направен при следните допускания:

- пещта (сушилнята) се разглежда като хомогенно в топлинно отношение тяло

- отделената топлинна енергия е от електрически нагреватели с еднаква мощност P_1 . Техният брой е n , а броя на работещите е m . Така електрическата мощност, която загрява в общия случай е

$$P = \frac{m}{n} P_n = k_n P_n \quad (01)$$

където P_n е общата номинална инсталирана мощност,

$$P_n = n P_1 \quad (02)$$

- топлинната времеконстанта при загряване T_n и охлаждане $T_{охл}$ са еднакви

$$T_n = T_{охл} = T \quad (03)$$

- топлинният капацитет C и теплообменът (G_T) не зависят от броя на работещите нагреватели

Така топлинният процес се описва достатъчно точно с диференциалното уравнение [1], приемайки, че се осъществява с лъчение и конвекция

$$P = C_T \frac{d\theta}{dt} + G_T \theta \quad (1)$$

където:

C_T е топлинния капацитет

G_T – топлинната проводимост

θ – прегряването (над температурата на околната среда)

При нормални условия ($t=0$ и $\theta = \theta_0$) и отчитайки (1) решението е:

$$\theta = \frac{k_n P_n}{G_T} \left(1 - e^{-\frac{G_T t}{C_T}} \right) + \theta_0 e^{-\frac{G_T t}{C_T}} \quad (2)$$

при $t \rightarrow \infty$, температурата се установява

$$\theta = \frac{k_n P_n}{G_T} = \theta_{уст} \quad (3)$$

а ако се обозначи $\frac{C_T}{G_T} = T$ – топлинна времеконстанта, чиято стойност е числено равна на времето за достигане на $\theta_{уст}$ без топлообмен с околната среда

$$\theta = \theta_{уст} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + \theta_0 e^{-\frac{t}{T}} \quad (4)$$

Ако печта (сушилната) се включва, след като е придобила температурата на околната среда, т.е. $\Delta\theta_0 = 0$, температурата ще нараства по

$$\theta = \frac{k_n P_n}{G_T} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right), \quad (5)$$

и когато достигне до максималната температура, зададена от регулатора $\theta_{\max.p.}$, за време $t = t_{нагр.}$ уравнение (5) придобива вида

$$\theta_{\max.p.} = \frac{k_n P_n}{G_T} \left(1 - e^{-\frac{t_{нагр.}}{T}} \right) \quad (6)$$

от където може да се определи времето за достигане на $\theta_{\max.p.}$

$$t_{нагр.} = T \ln \frac{1}{1 - \frac{\theta_{\max.p.} G_T}{k_n P_n}} = T \ln \frac{1}{1 - \frac{\theta_{\max.p.}}{\theta_{уст}}} \quad (7)$$

Електрическата енергия, потребена за достигане на $\theta_{\max.p.}$ е:

$$W_{н.н.} = k_n P_n t_{нагр.} = k_n P_n T \ln \frac{1}{1 - \frac{\theta_{\max.p.}}{\theta_{уст}}} \quad (8)$$

Или

$$W_{н.н.} = k_n P_n \frac{C_T}{G_T} \ln \frac{1}{1 - \frac{\theta_{\max.p.} G_T}{k_n P_n}} \quad (9)$$

От (9) се вижда, че зависимостта на изразходваната енергия за достигане на $\theta = \theta_{\max.p.}$ от k_n , т.е. от броя на работещите нагреватели е в неявен вид, тъй като зависи и от времето $t_{нагр.}$

След достигане на $\theta_{\max.p.}$, регулаторът изключва нагревателите и започва процес на намаляване на температурата (охлаждане), описан с уравнението

$$\theta = \theta_{\max.p.} e^{-\frac{t}{T}} = \frac{k_n P_n}{G_T} \left(1 - e^{-\frac{t_{нагр.}}{T}} \right) e^{-\frac{t}{T}} \quad (10)$$

и достигайки настройката на регулатора $\theta_{\min.p.}$ за време $t_{охл.}$

$$\theta = \frac{k_n P_n}{G_T} \left(1 - e^{-\frac{t_{нагр.}}{T}} \right) e^{-\frac{t_{охл.}}{T}} = \theta_{\max.p.} e^{-\frac{t_{охл.}}{T}} \quad (11)$$

откъдето може да се определи и времето за достигане на $\theta_{\min.p.}$

$$t_{охл.} = T \ln \frac{\theta_{\max.p.}}{\theta_{\min.p.}} = \frac{C_T}{G_T} \ln \frac{\theta_{\max.p.}}{\theta_{\min.p.}} \quad (12)$$

След няколко цикъла печта (сушилната) преминава в квазистационарен режим, при което повишението на температурата се движи в границите от $\theta_{\min.p.}$ до $\theta_{\max.p.}$

Тогава $\theta_{\max}$ ще се достигне за време $t_{нагр}$

$$\theta_{\max} = \frac{k_n P_n}{G_T} \left(1 - e^{-\frac{t_{нагр.}}{T}} \right) + \theta_{\min.p.} e^{-\frac{t_{нагр.}}{T}} \quad (13)$$

нагревателите са включени за време

$$t_{нагр} = \frac{C_T}{G_T} \ln \frac{G_T \theta_{\min.p.} - k_n P_n}{C_T \theta_{\max.p.} - k_n P_n} \quad (14)$$

Относителната продължителност на нагряване от (12) и (14) е:

$$PB_{cm} = \frac{t_{нагр}}{t_{охл.} + t_{нагр}} = \frac{\frac{C_T}{G_T} \ln \frac{G_T \theta_{\min.p.} - k_n P_n}{C_T \theta_{\max.p.} - k_n P_n}}{\frac{C_T}{G_T} \ln \frac{\theta_{\max.p.}}{\theta_{\min.p.}} + \frac{C_T}{G_T} \ln \frac{G_T \theta_{\min.p.} - k_n P_n}{C_T \theta_{\max.p.} - k_n P_n}}$$

след преобразуване

$$PB_{cm} = \ln \left[\frac{G_T \theta_{\min.p} - k_H P_H \left(1 - \frac{\theta_{\max.p}}{\theta_{\min.p}} \right)}{C_T \theta_{\max.p} - k_H P_H \left(1 - \frac{\theta_{\max.p}}{\theta_{\min.p}} \right)} \right] \quad (15)$$

Потребената енергия за времето в квазистационарен режим с продължителност t_{cm} ще бъде:

$$W_{cm} = k_H P_H PB_{cm} t_{cm} = k_H P_H \ln \left[\frac{G_T \theta_{\min.p} - k_H P_H \left(1 - \frac{\theta_{\max.p}}{\theta_{\min.p}} \right)}{C_T \theta_{\max.p} - k_H P_H \left(1 - \frac{\theta_{\max.p}}{\theta_{\min.p}} \right)} \right] t_{cm} \quad (16)$$

като $t_{cm} = t_{\Sigma} - t_{нагр.н}$

Общата потребена ел. енергия за производствения процес с продължителност t_{Σ} ще бъде от (9) и (16)

$$W_{\Sigma} = W_{н.н} + W_{cm} = k_H P_H \frac{C_T}{G_T} \ln \frac{1}{1 - \frac{\theta_{\max.p} G_T}{k_H P_H}} + k_H P_H \ln \left[\frac{G_T \theta_{\min.p} - k_H P_H \left(1 - \frac{\theta_{\max.p}}{\theta_{\min.p}} \right)}{C_T \theta_{\max.p} - k_H P_H \left(1 - \frac{\theta_{\max.p}}{\theta_{\min.p}} \right)} \right] t_{cm}$$

$$W_{\Sigma} = k_H P_H \left\{ \frac{C_T}{G_T} \ln \frac{1}{1 - \frac{\theta_{\max.p} G_T}{k_H P_H}} + \ln \left[\frac{G_T \theta_{\min.p} - k_H P_H \left(1 - \frac{\theta_{\max.p}}{\theta_{\min.p}} \right)}{C_T \theta_{\max.p} - k_H P_H \left(1 - \frac{\theta_{\max.p}}{\theta_{\min.p}} \right)} \right] t_{cm} \right\} \quad (17)$$

Както можеше да се очаква, консумираната енергия зависи от броя на работещите нагреватели, но (17) показва, че тази зависимост е сложна. Броят на работещите еднотипни нагреватели, отчетен с коефициента k_H , участва не само като множител пред изразите за енергията в преходния и квазистационарния процес, а и в изразите под логаритмите.

Теоретично този израз може да бъде изследван количествено завръзката $W = f(k_H)$ като се използва изчислителна техника, но резултатите ще бъдат и функция на независимите променливи C_T , G_T , $\theta_{\min.p.}$, $\theta_{\max.p.}$ и P_H . Последните имат стойности значително различаващи се за всеки конкретен случай, а параметрите характеризиращи топлинния капацитет C_T и топлинната проводимост G_T много трудно може да бъдат определени с достатъчна точност.

Ето защо за количествена оценка трябва да се отдаде предпочитание към теоретично експерименталния подход в основата на който са данни от достатъчно точни измервания на параметри като: Време на преходния процес, до достигане на квазистационарната фаза; продължителността на квазистационарния режим и характеризация го коефициент на включване ПВ, свързан с температурите на превключване на регулатора $\theta_{\min.p.}$ и $\theta_{\max.p.}$.

Времената може да се отчетат от запис на консумираната мощност (енергия) за един технологичен цикъл или чрез хронометриране и да се използват като база данни за достатъчно точна количествена оценка на негативното влияние на излезлите от работа нагреватели върху енергийната ефективност на електрическите пещи.

Теоретично-експериментален анализ

Ще се сравнят режимите на работа на пещ с мощност $P' = P_H$ в която всички нагреватели работят ($k_H' = 1$) и на пещ с мощност $P'' < P_H$ работеща с част от нагревателите си ($k_H'' < 1$), при което очевидно $P' > P''$ или $P' = k_H' P_H$, и те ще достигнат лимитираната от регулатор максимална температура $\theta_{\max.p.}$ за различно време, съответно t_1' и t_1'' (фиг. 1), тъй като

$$\theta_{\max} = \frac{P_H}{G_T} \left(1 - e^{-\frac{t_1'}{T}} \right), \quad (18)$$

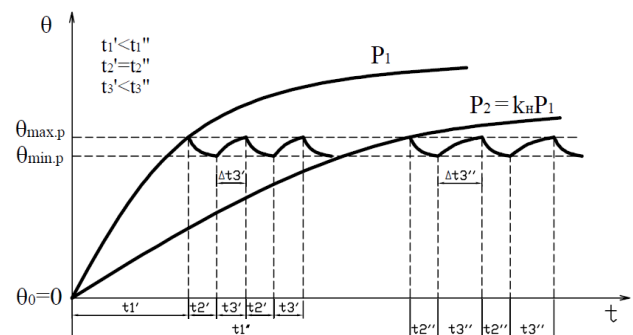
$$\text{и } \theta_{\max} = \frac{k_H P_H}{G_T} \left(1 - e^{-\frac{t_1''}{T}} \right)$$

$$\text{където: } \begin{aligned} t_1' &< t_1'' \\ k_H &< 1 \\ T' &= T'' = T \end{aligned}$$

Енергията, която ще е необходима в този преходен процес за достигане на $\theta_{\max.p.}$ от двете пещи ще бъде съответно

$$W_n' = P_H t_1' \quad (19)$$

$$W_n'' = k_H P_H t_1''$$



Фиг. 1. Режими на работа на пещите

След достигане на $\theta_{\max.p.}$, регулаторът изключва пещта ($P' = P'' = 0$) и те се охлаждат до $\theta_{\min.p.}$ по уравненията:

$$\theta_{\min.p.} = \theta_{\max.p.} e^{-\frac{t_2'}{T}} \quad (20)$$

$$\theta_{\min.p.} = \theta_{\max.p.} e^{-\frac{t_2''}{T}},$$

от което следва, че $t_2' = t_2'' = t_2$,

$$a \quad t_2 = T \ln \frac{\theta_{\max.p.}}{\theta_{\min.p.}} \quad (21)$$

Когато се достигне $\theta_{\min.p.}$, регулаторът включва нагревателите и температурата ще расте съответно до достигане на $\theta_{\max.p.}$ по уравненията:

$$\theta_{\max} = \frac{P_H}{G_T} \left(1 - e^{-\frac{t_3'}{T}} \right) + \theta_{\min.p.} e^{-\frac{t_3'}{T}}, \quad (22)$$

$$\theta_{\max} = \frac{k_H P_H}{G_T} \left(1 - e^{-\frac{t_3''}{T}} \right) + \theta_{\min.p.} e^{-\frac{t_3''}{T}}$$

Очевидно е, че $t_3' < t_3''$, което следва от (22) и фиг. 1.

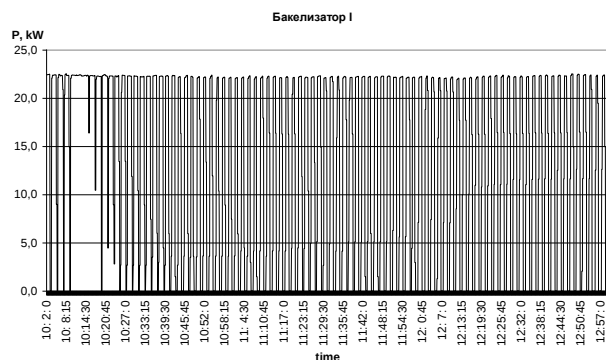
Енергията, необходима за изменението на температурата от $\theta_{\min.p.}$ до $\theta_{\max.p.}$ ще бъде различна

$$W_c' = P_H t_3' \quad (23)$$

$$W_c'' = k_H P_H t_3''$$

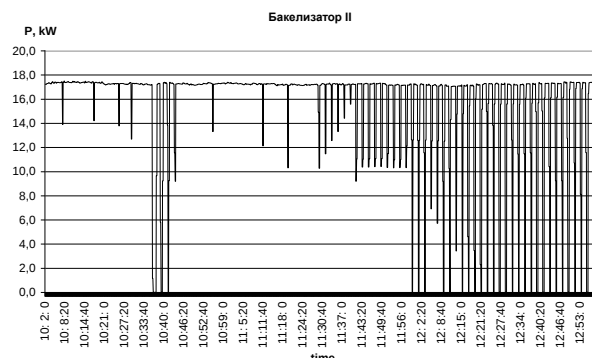
След няколко цикъла на превключване пещите попадат в квазистационарен режим, при който температурата се мени в границите зададени с регулатора: при нагряване до $\theta_{\max.p.}$ и охлаждане до $\theta_{\min.p.}$

На фиг. 2 и фиг. 3 са показани експериментално получени записи на мощността на две еднакви пещи – Бакелизатори I и II в ЗАИ Берковица [2]. Мощността, която консумират е съответно 23kW и 17,5kW, като вторият бакелизатор (II) има изгорял нагревател. И двата бакелизатора са заредени с еднакво количество абразивни дискове. Коефициентите на натоварване по мощност са $k_H' = 1$ и $k_H'' = 0,75$.



Фиг. 2. Активна мощност на Бакелизатор I

От записите на мощността (фиг. 2 и фиг. 3) се отчитат мощността, продължителността на преходния и квазистационарния режим, както и времената на включване и изключване на нагревателите от регулатора, поддържащ температурата в интервала $\theta_{\min.p.}$ до $\theta_{\max.p.}$



Фиг. 3. Активна мощност на Бакелизатор II

Посочените данни и резултатите по изведените зависимости са систематизирани в следната таблица

Таблица 1

Параметър	Бакелизатор I	Бакелизатор II
Инсталирана мощност, kW	21,5	16,5
Брой на работещите нагреватели	4	3
Единична мощност на нагревателите, kW	5	5
Време за технологичен цикъл, h	18	18
Средна мощност в преходния режим, kW	23	17,5
Средна мощност в квазистационарния режим, kW	7,82	9,27
Време за достигане на $\theta_{\max.p.}$, min	25	95
Енергия, консумирана в преходния режим, kWh	9,58	27,71
Продължителност на включване ПВ в квазистационарния режим, %	34	53
Енергия, консумирана в квазистационарния режим, kWh	137,47	152,21
Обща консумирана енергия за технологичния цикъл, kWh	147,05	179,92

Резултатите, систематизирани в таблицата, дават достатъчно основание да се направят следните посъществени количествено изразени заключения, със значимост надхвърляща конкретните условия в ЗАИ:

1. В преходния процес, до достигане на квазистационарния режим в който температурата се изменя в границите $\theta_{\min.p.}$ и $\theta_{\max.p.}$, Бакелизатор II (с $0,75P_H$) е консумирал приблизително 3 пъти повече енергия при 25% по-малка мощност, но с 3,8 пъти по-голяма продължителност по време.

2. В квазистационарния режим при охлаждане ($\theta_{\max.p.} \rightarrow \theta_{\min.p.}$) времената на паузите са равни $t_2' = t_2''$, а при загряване $t_3' \approx 2t_2''$, което се отразява на параметъра ПВ: $PВ' < PВ''$, като продължителността на включване при Бакелизатор II е с 55,9% по-голяма спрямо тази на I. Средната мощност, консумирана от Бакелизатор II е 18,5% по-голяма от Бакелизатор I, а енергията – с 10,72%.
3. За целия технологичен цикъл съдържащ преходен и квазистационарен режим Бакелизатор II е консумирал 22,3% повече ел. енергия, спрямо Бакелизатор I. Тази числова характеристика се отнася и за показателя специфично потребление на енергия (kWh/t), тъй като количеството абразивни дискове, зареждани за термична обработка са еднакви.
4. Практичният извод, който се налага от настоящият анализ е, че за минимизиране на разхода и

съответно на специфичното потребление на ел. енергия, не трябва да се допуска работа на ел. пещи с изгорели (изключени) нагреватели и това е една възможност за сериозно подобряване на енергийната ефективност.

Направените изводи може да се екстраполират и към пещи с течни и газообразни горива, където трябва също да се изключва режим под номиналния за икономия на гориво. При режим с непълно топлинно натоварване специфичният разход на гориво ще бъде по-голям, а енергийната ефективност – по-малка.

Литература

Доклад за обследване на промишлената система на Завод за абразивни инструменти (ЗАИ) гр. Берковица, 2008/2009г. Архив СМС-С ЕООД
 Основы теории электрических аппаратов, под ред. Буткевича, "Высшая школа", М, 1970