GRANT journal
ISSN 1805-062X, 1805-0638 (online), ETTN 072-11-00002-09-4

EUROPEAN GRANT PROJECTS | RESULTS | RESEARCH & DEVELOPMENT | SCIENCE

Optimalizácia výpalu žiaruvzdorných materiálov v tunelovej peci

Diana Ráškayová[1]

[1] Technická univerzita v Košiciach, Fakulta baníctva, ekológie, riadenia a geotechnológií, Ústav riadenia a informatizácie výrobných procesov; Boženy Němcovej 3, 040 01 Košice; diana.raskayova@tuke.sk

Grant: APVV-14-0892
Názov grantu: Moderné metódy, algoritmy a prostriedky pre modelovanie, simuláciu, riadenie, analýzu a syntézu procesov a riadiacich systémov
Oborové zameranie: JP Priemyselné procesy a spracovanie

© GRANT Journal, MAGNANIMITAS Assn.

Abstrakt V príspevku je popísaný simulačný model tunelovej pece a jeho využitie pre optimálne nastavenie príkonov paliva do horákových zón v systéme optimalizácie s modelom. Simulačný model tunelovej pece je jedným zo základných blokov systému optimalizácie s modelom. Ďalším dôležitým blokom je účelová funkcia, ktorá matematicky vyjadruje cieľ optimalizácie. Príspevok prezentuje aplikáciu gradientnej metódy pre určenie optimálnych príkonov do horákových zón tunelovej pece pri rôznych počtoch optimalizovaných parametrov. Výsledky sú uvedené v troch variantoch pre minimalizáciu účelovej funkcie na základe odlišného počtu optimalizovaných parametrov v jednotlivých variantoch. Cieľom je minimalizácia rozdielu teplôt medzi modelovou a žiadanou teplotou vsádzky v tunelovej peci pri optimálnom nastavení príkonov do horákových zón tunelovej pece.

Kľúčové slová Optimalizácia, tunelová pec, gradientná metóda

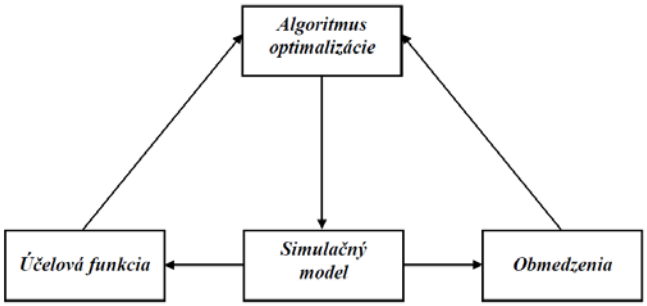
1. ÚVOD

Priemyselné pece patria nesporne do skupiny technologických agregátov, ktoré sú investičné náročné a vyznačujú sa veľkou spotrebou energie. Optimalizácia je jednou z efektívnych ciest vedúcej k racionalizácií výroby a k znižovaniu fixných i variabilných nákladov (energetických) technologických zariadení. Procesy v tepelných agregátoch sú tak zložité vo vzájomnej interakcii, že bez komplexného pohľadu akékoľvek čiastkové optimalizačné riešenie nemusí splniť očakávania riešiteľa. Z tohto pohľadu sa javí ako schodná cesta optimalizácia priemyselných pecí pomocou komplexných simulačných modelov.

Simulačný model je efektívnym nástrojom pre optimalizáciu konštrukcie pece i pece i pre jej optimálne riadenie. Optimalizácia využíva princíp „Optimalizácie s modelom“. Tento princíp umožňuje riešiť zložité optimalizačné úlohy s rôznymi typmi obmedzujúcich podmienok. [1]

2. SYSTÉM OPTIMALIZÁCIE S MODELOM

Pre optimálne nastavenie vstupných parametrov využijeme tzv. Systém optimalizácie s modelom, ktorý v sebe zahŕňa optimalizačný algoritmus hľadania optimálnej varianty (Obr.1). Tento systém pozostáva zo štyroch blokov. Základným blokom je simulačný model, v našom prípade je to simulačný model tunelovej pece. Ďalšími časťami systému sú účelová funkcia, obmedzenia a algoritmus optimalizácie. Systém optimalizácie s modelom riadi pomocou optimalizačného algoritmu priebeh simulácií tak, aby účelová funkcia (kritérium optimality) dosiahla extrém a sústava obmedzení bola splnená. Riadenie priebehu simulácií sa uskutočňuje zmenou vstupných parametrov simulačného modelu [2, 3].



Obr. 1: Systém optimalizácie s modelom

2.1 Simulačný model tunelovej pece

Predstavuje zjednotený simulačný systém, ktorý tvoria dva modely:

a) Model tunelovej pece
b) Model riadiaceho systému

a z ďalších nosných softvérových produktov ako je menu, generovanie grafov a tabuliek. Nasledovne zložená osnova simulačného systému dovoľuje celistvý návrh a projektovanie riadiaceho systému synchrónne s navrhovaním tunelovej pece, čo znamená kvalitný priebeh v súhrnnom navrhovaní tunelovej pece.

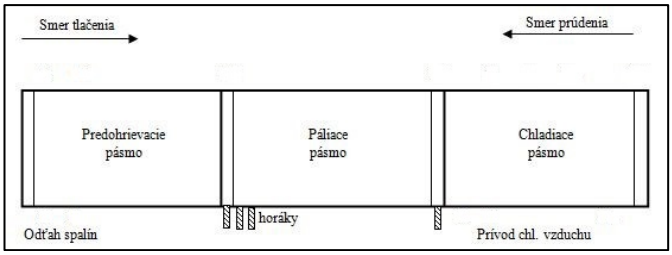
Medzi základné funkcie integrovaného programového systému patrí tvorba a využívanie 2 databáz, t.j. databáza teplo-fyzikálnych vlastností materiálu a databáza hraničných teplôt a cien materiálu; naplnenie užívateľského vstupného dátového súboru, ktorým si užívateľ definuje parametre tunelovej pece; simulácia činnosti tunelovej pece; kontrola správnosti a diagnostika vstupného dátového súboru; optimalizácia výmurovky z hľadiska minimalizácie nákladov; spracovanie výsledkov simulácie do vstupných štandardných zostáv; tvorba grafických výstupov a

zostáv. Medzi základné dátové súbory simulačného modelu patrí vstupný súbor (VSTUPY.DAT) a výstupný súbor (VYSTUP.DAT).

VSTUPY.DAT

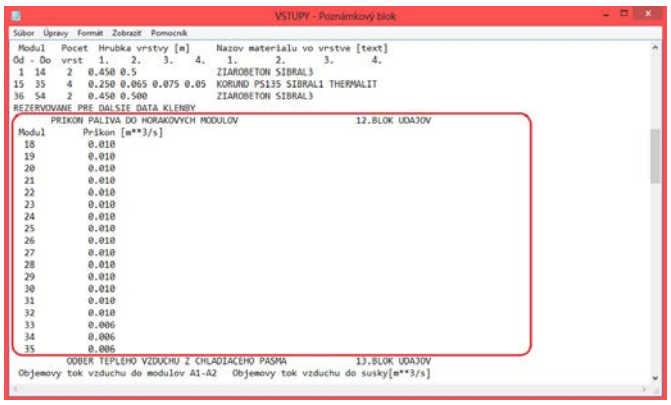
Obsahuje množinu údajov, ktorými užívateľ popíše, charakterizuje simulovanú tunelovú pec. Je rozdelený do 25. blokov údajov:

- 6. blok charakterizuje 3 druhy plynných palív, ktoré užívateľ mieni použiť pri simulácii,
- 7. blok obsahuje údaje o spaľovacom vzduchu,
- 8. blok obsahuje údaje charakterizujúce konceptuálny návrh pece (Obr. 2),



Obr. 2: Schéma fiktívnej tunelovej pece

- 9. blok obsahuje údaje o pracovných rozmeroch modulu,
- 10. blok popisuje štruktúru výmurovkových vrstiev stien pece po jednotlivých moduloch,
- 11. blok popisuje štruktúru výmurovkových vrstiev klenby pece po jednotlivých moduloch.
- 12. blok umožňuje definovať príkon paliva do horákových modulov [m3.s-1] (Obr. 3),

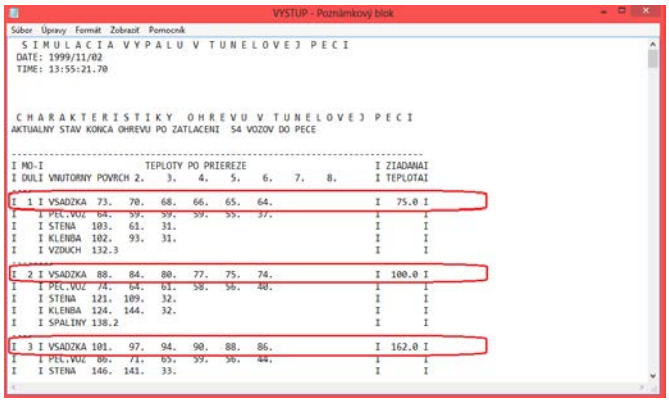


Obr. 3: 12. blok údajov vstupných parametrov v súbore VSTUPY.DAT

- 13. blok obsahuje požiadavky na odber teplého vzduchu chladiaceho pásma,
- 14. blok popisuje spôsob uloženia vsádzky na pecnom voze a jej parametre,
- 15. blok obsahuje údaje o počiatočnej teplote vsádzky na vstupe pece,
- 16. blok definuje žiadanú teplotnú krivku výpalu vsádzky v súradnicovom systéme teplota – čas,
- 17. blok charakterizuje štruktúru výmurovky pecného voza,
- 18. blok obsahuje počiatočné teploty pecného voza na vstupe pece,
- 19. obsahuje maximálne teploty v podpecí, okolí a presnosť výpočtu,
- 20. blok obsahuje informácie o infiltrovanom vzduchu do pece,
- 21. blok definuje tlakový spád pecnej atmosféry voči tlaku podpecí,
- 22. blok obsahuje základné údaje k regulácii teplôt,
- 23. blok charakterizuje riadenie regulačných zón,
- 24. blok obsahuje základné údaje k regulácii odťahových spalinových klapiek,
- 25. blok obsahuje základné údaje k výpočtu termodynamiky priebehu endotermických chemických reakcií.

VYSTUP.DAT

Štandardný výstupný súbor pre užívateľa v čitateľnej forme – tabuľkový protokol. Obsahuje základné informácie v okamihu ukončenia simulácie v tvare dvoch tabuliek a textového zhodnotenia práce pece. Pre optimalizáciu sú dôležité teploty vsádzky (modelová a žiadaná) v jednotlivých moduloch pece (obr. 4).



Obr. 4: Výstupný dátový súbor VYSTUP.DAT

2.2 Optimalizačný algoritmus

Úlohou optimalizačného algoritmu je riadiť priebeh simulácií tak, aby účelová funkcia (kritérium optimality) dosiahla extrém a sústava obmedzení bola splnená. Riadenie priebehu simulácií sa uskutočňuje zmenou vstupných parametrov do tunelovej pece, ktoré tvoria optimalizovaný vektor. Zložky optimalizovaného vektora sú množstvá príkonu paliva do jednotlivých zón tunelovej pece. Algoritmus optimalizácie je založený na vhodnej optimalizačnej metóde. Pre úlohu optimálneho nastavenia vstupných parametrov tunelovej pece bola aplikovaná gradientná metóda.

Algoritmus gradientnej metódy pre riešenie uvedenej optimalizačnej úlohy je modifikáciou algoritmu jednoduchej gradientnej metódy pre optimalizáciu viacrozmerných problémov. Tento algoritmus je pomerne jednoduchý. Hodnotu účelovej funkcie určujeme na základe výsledkov z tunelovej pece. Pre každý optimalizačný krok je potrebné určiť jednotlivé zložky gradientu. Tieto zložky tvoria parciálne derivácie účelovej funkcie podľa jednotlivých zložiek optimalizovaného vektora. Algoritmus modifikovanej gradientnej metódy je nasledovný:

1. Nastavenie vstupných dát príkonu paliva do horákových zón tunelovej pece (v súbore (VSTUPY.DAT), i = 0 i – optimalizačný krok
2. simulácia,
3. výpočet účelovej funkcie F^i podľa (3),
4. $x_j = x_j + dif$, kde j je index optimalizovaného vektora,
5. simulácia,

6. výpočet účelovej funkcie F_j^i,
7. výpočet gradientu

$$grad\,\mathrm{F}(x_j) = \frac{F^i - F_j^i}{dif} \quad (1)$$

8. výpočet nových zložiek optimalizovaného vektora x^{i+1}
MIN → $x^{i+1} = x^i - h \cdot grad\,\mathrm{F}(x_j)$, kde h je krok metódy (2)
9. kontrola obmedzení (4),
10. simulácia,
11. výpočet účelovej funkcie F^{i+1},
12. ak $F^{i+1} < F^i$, potom $i = i+1$ a pokračuj na bod 4
ak $F^{i+1} > F^i$ potom $h = h/2$ a pokračuj na bod 8.

Výsledky systému optimalizácie s modelom pre stanovenie optimálnych príkonov paliva do horákových modulov sú prezentované v troch variantoch, ktoré sa od seba líšia počtom optimalizovaných parametrov. V prvom prípade sú optimalizované 2 parametre, v druhom 4 a v treťom 8 parametrov. Páliace pásmo modelu tunelovej pece je rozdelené na 18 horákových zón (obr. 3). Pri optimalizácii jednotlivých variant sme zvolili nasledovné rozdelenie intervalov horákových zón zobrazené v tabuľke č. 1.

Tab. 1Rozdelenie intervalov horákových zón tunelovej pece pre optimalizáciu jednotlivých variant

Variant	Optimalizovaný parameter	Horákové zóny (Moduly)
1	X_1	18 – 26
	X_2	27 – 35
2	X_1	18 – 21
	X_2	22 – 25
	X_3	26 – 30
	X_4	31 – 35
3	X_1	18 – 19
	X_2	20 – 21
	X_3	22 – 23
	X_4	24 – 25
	X_5	26 – 27
	X_6	28 – 29
	X_7	30 – 32
	X_8	33 – 35

2.3 Účelová funkcia

Účelová funkcia (Kritérium optimality) označuje cieľ optimalizácie. V našom prípade je vyjadrená ako funkcia F (3) s minimalizáciou kritéria kvality ohrevu:

$$F = \sum_{i=1}^{n} \left(T_i^{modelová} - T_i^{žiadaná}\right)^2 \quad (3)$$

$T_i^{modelová}$ je modelová teplota vsádzky v i-tom module tunelovej pece,
$T_i^{žiadaná}$ je žiadaná teplota vsádzky v i-tom module tunelovej pece,
i je index modulu tunelovej pece,
n je počet modulov pece (v našom prípade n = 54).
Cieľom je minimalizovať účelovú funkciu, tzn. minimalizovať rozdiel medzi modelovou a žiadanou teplotou vsádzky v tunelovej peci.

2.4 Obmedzenia

Obmedzenia sú kontrolované po každej simulácii, resp. po každom nastavení optimalizovaných parametrov optimalizačným algoritmom. V prípade prekročenia resp. porušenia niektorého z obmedzení je potrebné zohľadniť to v algoritme optimalizácie. Obmedzenia sú stanovené pre vstupné parametre tunelovej pece (4) vo forme:

$$0 \le x_j \le P_i^{max} \quad (4)$$

Kde x_j je optimalizovaný parameter *(j=2, j=4, j=8)*,
P_i^{max} je maximálna hodnota príkonu paliva v i-tej horákovej zóne.

3. VÝSLEDKY OPTIMALIZÁCIE

Dosiahnuté výsledky modifikovanej gradientnej metódy pre optimalizáciu príkonu paliva do horákových zón tunelovej pece s minimalizáciou kritéria kvality ohrevu sú uvedené v tabuľkách 2, 3 a 4. V tabuľke 2 sú prezentované výsledky pre dva optimalizované parametre s počiatočnými hodnotami optimalizovaných parametrov (X_1=0,0160, X_2=0,0150). Hodnotu účelovej funkcie sa podarilo minimalizovať z počiatočnej hodnoty 5609 na hodnotu 4179. Na základe optimalizácie príkonu paliva je priebeh modelovej a žiadanej teploty vsádzky znázornení na obrázku č. 5.

Tab. 2 Optimalizácia príkonu paliva do horákových zón tunelovej pece pri optimalizovaní 2 parametrov (variant 1)

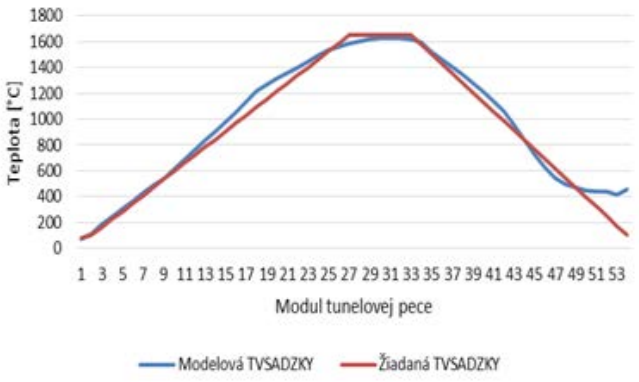
Opt. krok	X_1	X_2	F
0	*0.0160*	*0.0150*	5609
1	*0.0157*	*0.0146*	5106
2	*0.0155*	*0.0144*	4820
3	*0.0153*	*0.0143*	4603
4	*0.0152*	*0.0141*	4392
5	*0.0150*	*0.0140*	**4179**

Obr. 5: Priebeh modelovej a žiadanej teploty vsádzky po optimalizáii 2 parametrov

V tabuľke 3 sú uvedené výsledky pri optimalizovaní štyroch parametrov s počiatočnými hodnotami optimalizovaných parametrov (X_1=0,0160, X_2=0,0150, X_3=0,0140, X_4=0,0130).
Pri tomto variante sa pomocou gradientnej metódy podarilo minimalizovať hodnotu účelovej funkcie z počiatočnej hodnoty 4043 na hodnotu 3150. Na základe optimalizácie príkonu paliva je priebeh modelovej a žiadanej teploty vsádzky znázornení na obrázku č. 6.

Tab. 3 Optimalizácia príkonu paliva do horákových zón tunelovej pece pri optimalizovaní 4 parametrov (variant 2)

Opt. krok	X_1	X_2	X_3	X_4	F
0	*0.0160*	*0.0150*	*0.0140*	*0.0130*	4043
1	*0.0158*	*0.0148*	*0.0138*	*0.0128*	3797
2	*0.0157*	*0.0147*	*0.0137*	*0.0126*	3707
3	*0.0155*	*0.0145*	*0.0135*	*0.0124*	3401
4	*0.0153*	*0.0143*	*0.0134*	*0.0123*	3211
5	*0.0152*	*0.0144*	*0.0133*	*0.0122*	**3150**



Obr. 6: Priebeh modelovej a žiadanej teploty vsádzky po optimalizáii 4 parametrov

Výsledky poslednej varianty pre osem optimalizovaných parametrov s počiatočnými hodnotami optimalizovaných parametrov (X_1=0,0160, X_2=0,0150, X_3=0,0140, X_4=0,0130, X_5=0,0120, X_6=0,0110, X_7=0,0090, X_8=0,0080) sú uvedené v tabuľke 4. Pomocou gradientnej metódy sa podarilo minimalizovať hodnotu účelovej funkcie z počiatočnej hodnoty 3639 na hodnotu 2601. Na základe optimalizácie príkonu paliva je priebeh modelovej a žiadanej teploty vsádzky znázornení na obrázku č. 7. Počet optimalizačných krokov je rovnaký pre všetky rozdelenia intervalov vstupných parametrov do tunelovej pece.

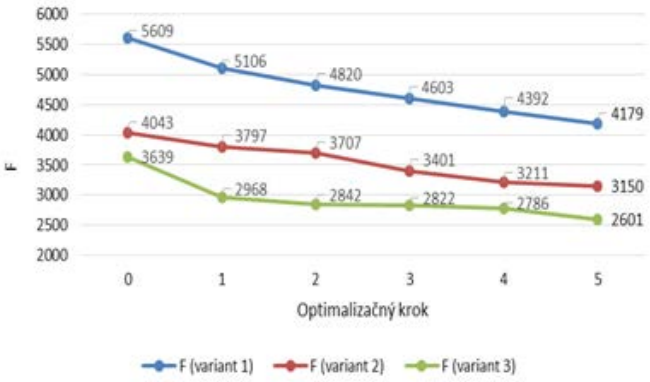
Tab. 4 Optimalizácia príkonu paliva do horákových zón tunelovej pece pri optimalizovaní 8 parametrov (variant 3)

Opt. krok	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	F
0	*0.0160*	*0.0150*	*0.0140*	*0.0130*	*0.0120*	*0.0110*	*0.0090*	*0.0080*	3639
1	*0.0166*	*0.0156*	*0.0146*	*0.0137*	*0.0127*	*0.0117*	*0.0100*	*0.0088*	2968
2	*0.0168*	*0.0157*	*0.0149*	*0.0142*	*0.0132*	*0.0122*	*0.0104*	*0.0093*	2842
3	*0.0167*	*0.0156*	*0.0148*	*0.0143*	*0.0134*	*0.0125*	*0.0104*	*0.0091*	2822
4	*0.0158*	*0.0142*	*0.0141*	*0.0150*	*0.0152*	*0.0146*	*0.0122*	*0.0088*	2786
5	*0.0151*	*0.0133*	*0.0132*	*0.0145*	*0.0150*	*0.0145*	*0.0120*	*0.0081*	**2601**

Obr. 7: Priebeh modelovej a žiadanej teploty vsádzky po optimalizáii 8 parametrov

4. ZÁVER

V príspevku je popísaná optimalizácia príkonu paliva do horákových zón tunelovej pece pri minimalizovaní kritéria kvality ohrevu s využitím simulačného modelu tunelovej pece. Dosiahnuté výsledky boli realizované pri troch variantoch, ktoré sa od seba líšili počtom optimalizovaných parametrov. Cieľom bolo minimalizovať účelovú funkciu, čiže minimalizovať rozdiel medzi modelovou a žiadanou teplotou vsádzky v tunelovej peci. Počas optimalizácie príkonu paliva do horákových zón tunelovej pece s rozdielnym počtom optimalizovaných parametrov sme zistili, že hodnota účelovej funkcie v jednotlivých variantoch sa so zvyšujúcim počtom optimalizovaných parametrov znižuje. V našom prípade sme dosiahli najmenšiu hodnotu účelovej funkcie po piatich optimalizačných krokoch pri 8 optimalizovaných parametroch (variant 3). Z dosiahnutých výsledkov vyplýva, že vďaka väčšiemu počtu optimalizovaných parametrov môžeme rozdiel medzi modelovou a žiadanou teplotou vsádzky efektívnejšie minimalizovať. U každej z variant je najväčší rozdiel medzi modelovou a žiadanou teplotou v posledných moduloch pece (50.-54.), čo predstavuje cca hodnotu 1000, o ktorú by mohla byť účelová funkcia znížená v prípade optimalizácie pre 50 modulov. Priebeh účelových funkcií počas optimalizačných krokoch pre jednotlivé varianty optimalizácie je zobrazený na obrázku č. 8.



Obr. 8: Priebeh účelovej funkcie pre jednotlivé varianty optimalizácie

Zdroje

1. KOSTÚR, K. Optimalizácia priemyselných pecí s využitím modelom. Košice: vydavateľstvo Technická univerzita Košice, 1998. ISBN 80-7099-326-X.
2. LACIAK, M., RÁŠKAYOVÁ, D. The using of the thermodynamic model for optimal setting of input parameters in the UCG process, 2016. In: ICCC 2016.-Danvers: IEEE, 2016 P. 418-423. ISBN 978-1-4673-8605-0.
3. LACIAK, M., KAČUR, J., DURDÁN, M., FLEGNER, P. Application of optimization method for optimal control of the steelmaking process, 2014. In: ICCC 2014 : proceedings of the 2014 15th International Carpathian Control Conference : Velké Karlovice, May 28-30, 2014. - Danvers : IEEE, 2014 P. 296-300. - ISBN 978-1-4799-3527-7.
4. KOSTÚR, K., LACIAK, M., BUBELÍNY, P. Modelovanie a optimálne riadenie konvertorového procesu. Košice: Vienala, - 2002. ISBN 80-88922-62-3.
5. KOSTÚR, K. Optimalizácia ohrevu brám v narážacej peci, 1997. In: Hutnické listy. Vol. 52, no. 5 (1997), p. 14-19.