

Sborník z 2. semináře

ZKOUMÁNÍ VÝROBNÍCH OBJEKTŮ A TECHNOLOGIÍ  
ARCHEOLOGICKÝMI METODAMI

11. prosince 1979, Technické muzeum v Brně

---

Karel S t r á n s k ý , VAAZ Brno

Teorie fyzikální podobnosti aplikovaná na pochody přímé  
výroby železa z rud v šachtových pecích

---

Na základě zkušeností s přímou výrobou železa z rud v šachtových pecích označených jako olomučanská varianta 1 a sudická varianta 2 šachtové pece a s využitím údajů publikovaných v literatuře 3 , byl učiněn pokus vyjádřit příčinné souvislosti mezi parametry charakterizujícími zmíněný způsob výroby, kvantitativní formou. K tomuto vyjádření bylo využito teorie fyzikální podobnosti a teorému podle něhož je možno vztah mezi veličinami, jejichž obecné rozměry lze charakterizovat prostřednictvím  $r$  základních rozměrů, nahradit vztahem mezi  $-r$  bezrozměrnými kritérii podobnosti.

Úloha byla řešena tím, způsobem, že nejdříve byly na základě obecně platných fyzikálně metalurgických zákonitostí a s využitím zkušeností vybrány a definovány parametry o nichž se předpokládalo, že mohou významně ovlivňovat pochod přímé výroby železa z rud v šachtových pecích. Poté byla způsobem obvyklým při rozměrové analýze stanovena kritéria fyzikální podobnosti umožňující v relativně nejjednodušší formě charakterizovat podobnostní vztahy mezi vybranými a definovanými parametry. Dále byla navržena rovnice o níž se předpokládalo, že umožní v prvním přiblížení vystihnout s přiměřenou přesností příčinné souvislosti mezi fyzikálními kritérii podobnosti. Fyzikálně metalurgické konstanty vystupující v této rovnici byly stanoveny metodou nejmenších čtverců tak, že bylo použito výsledků experimentů 21 taveb v šachtových pecích. Z toho 15 taveb bylo převzato z literatury 3 , 4 tavy z lit. 1 a 2 tavy z lit. 2 . Významnost takto získaného vztahu

a taktéž významnost fyzikálně metalurgických konstant byla závěrem hodnocena prostřednictvím testů matematické statistiky. Konečně v samotném závěru je poukázáno na některé zajímavé důsledky, které sebou přináší zmíněný přístup.

Při výběru fyzikálně metalurgických parametrů bylo respektováno (uvažováno) členění pochodu přímé výroby železa a rud v šachtových pecích do čtyř charakteristických období.

1. Údobí zapálení a předehřívání pece zaplněné pouze dřevěným uhlím.

2. Údobí rovnoměrného přísazování předem připravené vsázky železné rudy a dřevěného uhlí, tj. období rovnoměrného chodu pece.

3. Údobí dohořívání pece, která je doplňována pouze dřevěným uhlím.

4. Údobí samovolného dohořívání paliva na přirozený tah a chladnutí pece včetně vybourání pece a vyjmutí železné houby jako konečného produktu.

Při výběru a hodnocení parametrů se předpokládalo, že rozhodující význam pro reprodukovatelnost pochodu má 2. období.

#### Fyzikálně metalurgické parametry charakterizující pochod přímé výroby železa z rud v šachtových pecích

Tyto parametry je možno rozdělit podle jejich povahy do tří skupin. Jsou to: parametry pece, parametry pochodu a fyzikální konstanty a veličiny. Přehled těchto vybraných a definovaných parametrů následuje:

Parametr	Označení a charakteristika		Obecný rozměr
Pec	- průměr šachty v úrovni dyzen	$d$	m
	- výška šachty od urovně dyzen	$h$	m
Pochod	- rychlost průchodu železné rudy šachtou	$w_r$	kg/s
	- rychlost hoření paliva (dřevěného uhlí)	$w_p$	kg/s
	- rychlost tvorby produktu, tj. železné houby	$w_{Fe}$	kg/s
	- doba ustáleného chodu pece	$\tau$	s
	- teplota v definovaném místě pece	$T$	K

Fyzikální parametry	- součinitel přestupu tepla stěnou pece	$\alpha$	$\text{kg/s}^3\text{K}$
	- výhřevnost paliva (dřevěného uhlí)	$c_p$	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$
	- teplo uvolněné nepřímou redukcí železné rudy	$c_r$	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$
	- relativní obsah železa k rudě vztahovaný k $\text{Fe}_2\text{O}_3$ (tj. pro hematit je $b_r = 1$ )	$b_r$	- 1

Pozn.: Parametr  $b_r$  sloužil jako korekční činitel pro tažby u kterých bylo použito ve vsázce limonitu.

Z přehledu je zřejmé, že bylo vybráno a definováno  $n = 10$  parametrů, jejichž obecné rozměry je možno vyjádřit prostřednictvím  $r = 4$  základních rozměrů (m, kg, s, K). Podle  $\pi$  - teoremu je tudíž možno nahradit vztah mezi 10 parametry vztahem mezi  $n - r = 10 - 4 = 6$  kritérii podobnosti. Při volbě těchto kritérií byly jako doplňující podmínky při rozměrové analýze vzaty v úvahu geometrické podmínky a energetické podmínky. Řešení uskutečněné obvyklou cestou 4 vedlo k těmto kritériím podobnosti.

Kritérium podobnosti	Význam kritéria podobnosti
$\pi_1 = \frac{w_{\text{Fe}}}{w_r}$	Relativní produkt (výtěžek) udává podíl železné houby k rudné vsázce; toto kritérium je funkcí všech zbývajících a charakterizuje účinnost pochodu ( $\eta$ ).
$\pi_2 = \frac{b_r w_r c_r}{\alpha' T d^2}$	Poměr kritéria tepelného zřídla při redukcí kyslíčků železa na čisté železo a Biotova Kritéria vyjadřujícího tepelné ztráty pece.
$\pi_3 = \frac{w_p c_p}{\alpha' T d^2}$	Poměr kritéria tepelného zřídla daného hořením paliva (dřevěného uhlí) a Biotova kritéria charakterizujícího tepelné ztráty pece.
$\pi_4 = \frac{w_p}{w_r}$	Poměr charakterizující podíl paliva a železné rudy ve vsázce.
$\pi_5 = \frac{h}{d}$	Poměr charakterizující štíhlost pece.
$\pi_6 = \frac{c_p}{d^2}$	Kritérium charakterizující ustálenost energetického režimu pece.

Vztah mezi kriterii podobnosti, tj. kriteriální závislost, byla vyjádřena mocninnou funkcí ve tvaru

$$\eta = \frac{w_{Fe}}{w_r} = K \prod_{i=2}^6 \pi_i^{n_i} \quad (1)$$

která se logaritmováním změnila na funkci typu

$$\ln \eta = \ln K + \sum_{i=2}^6 n_i \ln \pi_i \quad (2)$$

Funkce (6) bylo použito k vyrovnání experimentálních dat metodou nejmenších čtverců. Ke zpracování a stanovení konstant  $K$ ,  $n_i$  ( $i = 2$  až  $6$ ) sloužil samočinný počítač Hewlet Packard. Vstupní a vyrovnané údaje včetně příslušných rozdílů jsou uvedeny v tabulce dat regresní analýzy. Parametry  $\alpha'$ ,  $T$ ,  $c_p$ ,  $c_r$  byly považovány za konstantní.

#### Výsledky zpracování experimentálních dat pro šachtové pece

Výsledná funkce stanovená regresní analýzou má konkrétní tvar

$$\eta = 2,46 \cdot 10^{-2} \left( \frac{b_r w_r}{d^2} \right)^{0,748} \cdot \left( \frac{w_p}{d^2} \right)^{0,233} \cdot \left( \frac{w_p}{w_r} \right)^{0,458} \cdot \left( \frac{h}{d} \right)^{1,611} \cdot \left( \frac{\tau}{d} \right)^{2,0328} \quad (3)$$

při čemž vliv parametrů  $\alpha'$ ,  $T$ ,  $c_p$ ,  $c_r$ , o nichž se předpokládalo, že mají v mezích chyb konstantní hodnotu, je zahrnut v konstantě  $2,46 \cdot 10^{-2}$ . Vzájemné porovnání změřených hodnot výtěžku  $\eta$  a  $\eta$  hodnot aproximovaných vztahem (3) je na obr. 1. Testy statistické významnosti byly u sledovaného souboru taveb ověřeny tyto skutečnosti:

Celkový koeficient korelace má hodnotu  $R = 0,9022$  a v porovnání s kritickou hodnotou významný na úrovni statistické významnosti lepší než  $0,001$ . Lze tudíž říci, že vztah (3) se uplatňuje při popisu pochodů přímé výroby železa z rud s pravděpodobností větší než  $99,9\%$ .

Test adekvátnosti má hodnotu  $F = 13,13$ , která je rovněž významná na úrovni statistické významnosti lepší než  $0,001$ . Lze tedy soudit, že uvedený soubor kritérií popisuje reálný průběh pochodů přiměřeným způsobem.

Testy významnosti exponentů  $n$  ( $i = 2$  až  $6$ ) přinesly tyto výsledky:

Nejvýznamněji se uplatňuje vliv kritéria  $(h/d)$  vyjadřujícího štíhlost pece. Testovací kritérium  $t = 4,34$  je silně statisticky významné. Rostoucí štíhlost pece tedy významně zvyšuje produkt pochodu.

Významný vliv na produkt (výtěžek) pochodu má také kritérium  $(b_r w_r / d^2)$ . Příslušný exponent má testovací kritérium  $t = 1,32$ , které lze hodnotit také jako statisticky významné. S rostoucí hodnotou kritéria  $(b_r w_r / d^2)$  produkt, tj. účinnost pochodu roste, avšak ne tak intenzivně a významně jako v předešlém případě.

V pořadí klesající statistické významnosti se dále uplatňuje poměr paliva a rudy  $(w_p / w_r)$ . Příslušnému exponentu odpovídá testovací kritérium  $t = 0,742$ . S rostoucí hodnotou poměru  $(w_p / w_r)$  výsledný produkt, tj. účinnost pochodu nevýznamně roste.

Ještě méně významněji se uplatňuje vliv kritéria  $(w_p / d^2)$ , jehož exponentu odpovídá testovací kritérium  $t = 0,367$ . S rostoucí hodnotou poměru  $(w_p / d^2)$  tedy účinnost pochodu nevýznamně roste.

Jako zcela nevýznamný se v daném souboru hodnocených taveb projevil vliv kritéria ustálenosti (rovnoměrnosti) chodu pece  $([\tau/d]^2)$ . Příslušnému exponentu odpovídá testovací kritérium  $t = 0,239$ , které je statisticky nevýznamné. Přesto se ukazuje, že s rostoucí hodnotou poměru  $(\tau/d^2)$  účinnost pochodu, tj. relativní produkt poněkud roste.

Za předpokladu ustáleného chodu pece po dobu je možno určit hmotnost železné houby vyrobené v šachtové peci ze vzorce

$$Q_{Fe} = w_{Fe} \tau \quad (4)$$

Kombinací rovnic (4) a (3) po upravě získáme

$$Q_{Fe} = 0,0246 \cdot b_r^{0,748} \cdot h^{1,611} \cdot \tau^{1,066} \cdot w_r^{1,290} \cdot s_p^{0,691} \cdot d^{-3,640} \cdot \text{kg} \quad (5)$$

Vztah je přibližný a vyplývá z něho, že hmotnost železné houby

vyrobené v šachtové peci je silně ovlivňována zejména výškou šachty  $h$  a jejím průměrem  $d$ . Chceme-li za jinak stejných podmínek zvýšit produkci železné houby, má smysl zvyšovat výšku pece, avšak nikoliv její průměr. Pokud bychom např. zvětšili 2x průměr šachty, pak pro zachování stejné hmotnosti  $Q_{Fe}$  je nutno zvýšit výšku šachty 4,79x. (Je třeba poznamenat, že rozměry času v rovnicích (3) až (5) jsou v hod. a rozměry délek v dm).

Rovnice (5) dále potvrzuje zkušenost, že celková hmotnost železné houby vyrobené v šachtové peci roste

- s jakostí železné rudy ( $b_r^{0,748}$ );
- s dobou rovnoměrného chodu pece ( $\tau^{1,066}$ ), závislost je zhruba přímo uměrná;
- s rychlostí klesání rudné vsázky ( $w_r^{1,290}$ );
- s rychlostí hoření paliva ( $w_p^{0,694}$ ).

Z fyzikálně metalurgického hlediska lze dále říci, že nejvýznamněji se na účinnosti pochodu projevuje

- vliv produkce kysličníků železa kysličníkem uhelnatým po výšce šachty, tj. kritérium ( $h/d$ );
- vliv jakostní rudné vsázky vyjádřený kritériem ( $b_r w_r / d^2$ );
- poměr paliva a rudy charakterizovaný poměrem ( $w_p / w_r$ );
- teplota v peci odrážející se nejvíce v kritériu ( $w_p / d^2$ ) a
- v malé míře také poměr celkové doby rovnoměrného chodu pece k jejímu průměru, tj. poměr ( $\tau / d^2$ ).

Má-li se dosáhnout co nejreprodukovatelnějších výsledků experimentálních taveb v šachtových pecích, pak je zapotřebí dodržovat v první řadě geometrickou podobnost pecí a jejich rozměry, jakost rudné vsázky, poměr paliva a rudy a v poslední řadě také rychlost hoření dřevěného uhlí, tj. rychlost dmýchání vzduchu.

Ze všech sledovaných parametrů mají na reprodukovatelnost pochodu největší vliv změny průměru pece, poté výšky pece, rychlost klesání rudné vsázky, hoření paliva a jakosti železné rudy. Vliv změn doby rovnoměrného chodu pece byl v daném souboru nejméně významný.

Výsledků doosažených v této studii je možno využít při experimentálních tavebách v šachtových pecích o geometrii podle obr. 1. To znamená k předběžné volbě fyzikálně metalurgických parametrů vzhledem k základním rozměrům pece a k odhadu produktu podle rovnice (3).

## Apendix

Odhadněte množství železné houby kterou je možno vyrobit v šachtové peci o průměru 2,5 dm, výšce 8,6 dm za 6 hod 30 min ustáleného chodu pece, jestliže se v témtéž udobí zpracuje 40 kg hematitu a spálí 45 kg dřevěného uhlí. Odhadněte rovněž účinnost ( $\eta$ ) pochodu.

Parametry pece a pochodu jsou tyto:

- průměr pece	$d = 2,5$ dm
- výška pece	$h = 8,6$ dm
- rychlost průchodu hematitu šachtou	$w_r = \frac{40}{6,5} = 6,15$ kg/hod
- rychlost hoření dřevěného uhlí	$w_p = \frac{45}{6,5} = 6,92$ kg/hod
- doba ustáleného chodu pece	$\tau = 6,5$ hod.
- relativní obsah železa v hematitu vzhledem k $Fe_2O_3$	$b_r = 1$

Podle rovnice (5) po dosazení uvedených parametrů získáme množství železné houby

$$Q_{Fe} = 0,0246 \cdot 1^{0,748} \cdot 8,6^{1,611} \cdot 6,5^{1,066} \cdot 6,15^{1,290} \cdot 6,92^{0,691} \cdot 2,5^{-3,640} = 8,18 \text{ kg.}$$

Přesnost odhadu je podle zkušeností asi jedna třetina stanovené hodnoty.

Účinnost pochodu odhadneme podle kritériální rovnice (3). Po dosazení hodnot získáme

$$\eta = 0,0246 \cdot \left(\frac{1 \cdot 6,15}{2,5^2}\right)^{0,748} \cdot \left(\frac{6,92}{2,5^2}\right)^{0,233} \cdot \left(\frac{6,92}{6,15}\right)^{0,458} \cdot \left(\frac{8,6}{2,5}\right)^{1,611} \cdot \left(\left[\frac{6,5}{2,5}\right]^2\right)^{0,0328} = 0,2047$$

Přesnost odhadu je taktéž asi 1/3 stanovené hodnoty výtěžku

$$\eta = w_{Fe}/w_r.$$

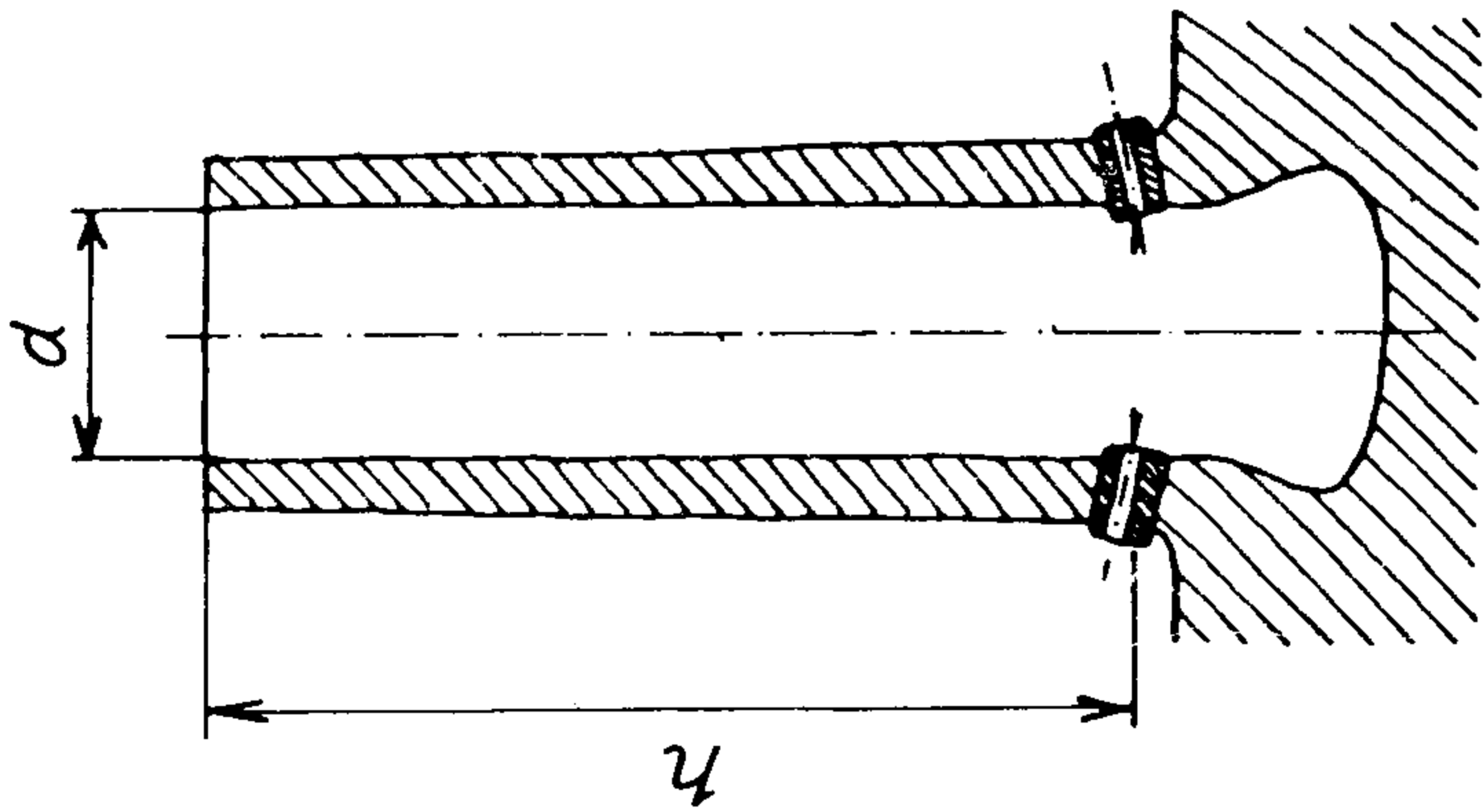
Za uvedených podmínek bylo možno vyrobit v šachtové peci asi  $8,2 \pm 2,7$  kg železné houby, přičemž účinnost pochodu se pohybovala při použití jakostního hematitu kolem  $20 \pm 7$  %.

K těmto odhadům je třeba podotknout, že jsou oprávněné pouze v rozmezí pokusně ověřených údajů tj. pro hodnoty kritérií a parametrů v lit. 1 až 3, popř. v rámci hodnot v tabulce regresních dat.

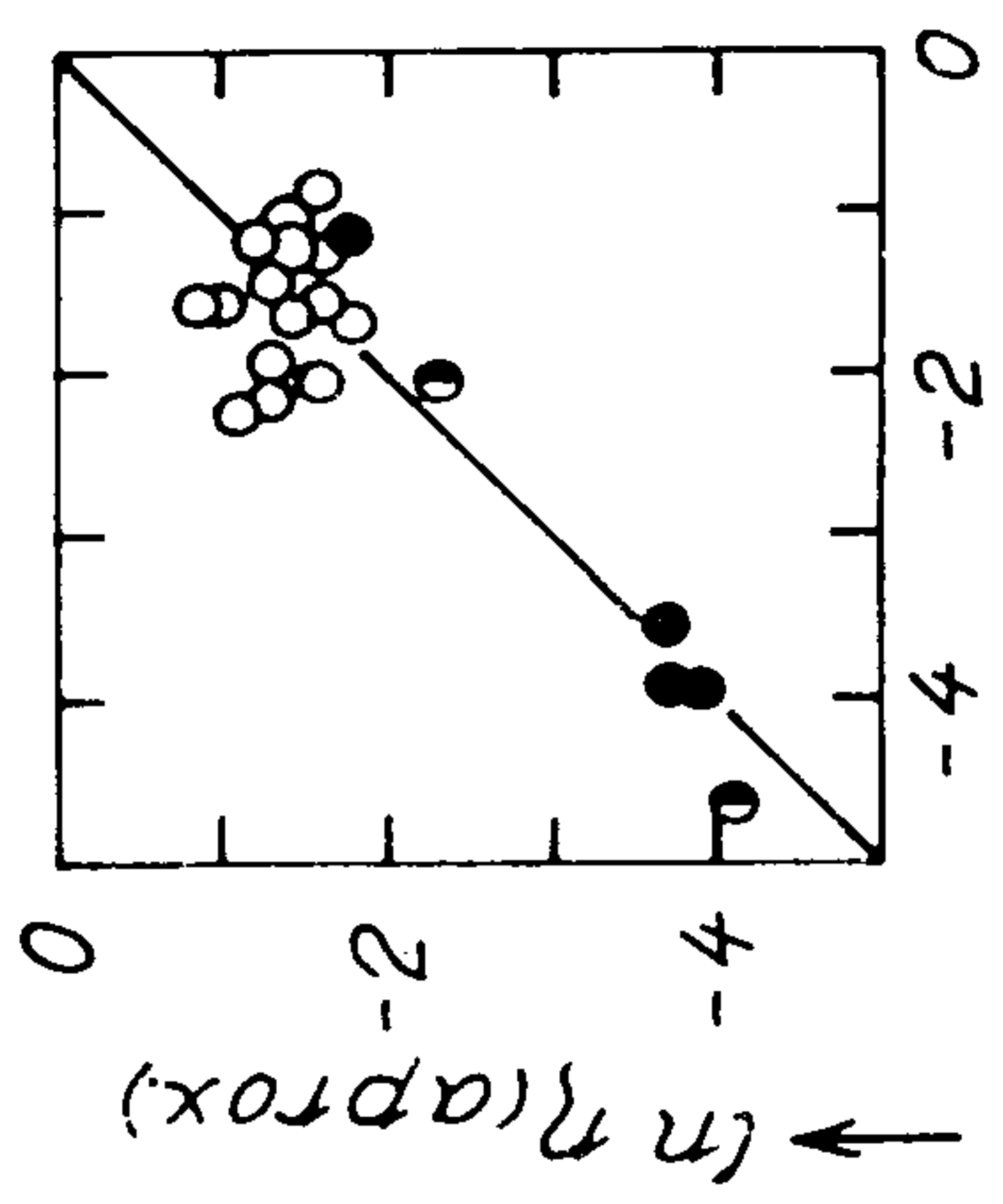
## Literatura

- 1 Cenek, M. - Bezděk, L. - Stránský, K. - Souchopová, V.:  
Přímá výroba železa z rud na Blanensku. - "In"  
Knižnice odborných a vědeckých spisů VUT v Brně,  
1975, B - 61, s. 79-90.
- 2 Stránský, K. - Souchopová, V. - Ludikovský, K: Pokusné tavby  
s přímou výrobou železa z rud v šachtových pecích  
na Blanensku. - "Slévárenství", 26, 1978. č. 11,  
s. 464 - 467
- 3 Tylecote, R.F. - Austin, J.N. - Wraith, A.E.: Iron smelting  
experiments with and shaft furnace of the Roman  
period. - "In" Die Versuchsmelzen und ihre Bedeutung  
für die Metallurgie des Eisens und dessen geschichte.  
Schaffhausen, Prag, 1973, s. 25 až 49.
- 4 Kožešník, J.: Fyzikální podobnost a stavba modelů. JČMaF,  
Praha 1948, s. 25.





a) Ideální geometrie šachtové pece



→  $\ln \eta$  (měř.)  
 ● [1], ○ [2], ○ [3]

b) Vztah mezi měřenou a vypočtenou hodnotou  $\eta = w_{Fe} / w_T$  podle rovnice (3)