

Hodnocení zádrže dispersního materiálu v průmyslovém rotačním horizontálním bubnu.

Jiří Thýn, Rudolf Žitný, Tomáš Čechák^{*)}, Jaroslav Kluson^{*)}, Václav Spváček^{*)}, Josef Gernt^{*)}

Ústav procesní a zpracovatelské techniky, ^{*)} Katedra Dosimetrie a aplikace ionizujícího záření,

České Vysoké Učení Technické v Praze

1. Úvod

Optimální chod průmyslových rotačních horizontálních bubnů používaných pro chlazení, ohřev, sušení resp. pro chemické reakce sypkých materiálů a plynů závisí mimo jiné na množství materiálu, které se nachází uvnitř zařízení tj. na jeho zádrži. Zádrž totiž ovlivňuje jak přestup tepla tak i spotřebu energie potřebnou pro otáčení pece resp. pro pohyb materiálu v bubnu. Množství materiálu v bubnu závisí na konstrukčních parametrech zařízení (jako je průměr, délka a sklon pece), na vlastnostech sypkého materiálu v bubnu (jako je velikost, tvar, hustota a vlhkost částic) a na provozních podmínkách (jako je dávkované množství sypkého materiálu, množství a směr proudění plynu a otáčení bubnu).

Stanovení zádrže přímou metodou tj. vážením materiálu, který zůstal v bubnu po odstavení vstupního a výstupního proudu materiálu se používá v laboratorním nebo v poloprovodním měřítku. Touto metodou získané empirické vztahy vyjadřují vliv sledovaných proměnných tj. technických podmínek jako je průměr, délka a sklon pece, dále vliv provozních podmínek jako jsou např. otáčky bubnu a hodnoty průtoků materiálu nebo plynu ale i vliv některých vlastností materiálu jako je např. sypný úhel a velikost částic. Ostatní vlivy vyplývající z konstrukčních změn resp. vlastností materiálu vyjadřují hodnoty konstant, které se musí určit měřením na konkrétním bubnu s konkrétním materiálem.

V průmyslové praxi se musíme spokojit s nepřímým stanovením zádrže pomocí metody vzruchu a odezvy, přičemž se využívá vztah mezi zádrží $Z[\text{kg}]$, střední dobou zdržení $t_{st\phi} [\text{h}]$, a výkonem (prosazením, hmotnostním průtokem materiálu) $\dot{M}_s [\text{kg/h}]$

$$Z = t_{st\phi} \dot{M}_s = \dot{M}_s \int t E(t) dt. \quad (1)$$

Tento vztah byl odvozen pro nestlačitelné materiály a pro ustálené podmínky (např. hmotnostní průtok \dot{M}_s musí být konstantní).

Střední doba zdržení na provozním zařízení se určí indikátorovou metodou vzruchu a odezvy na základě stanovení distribuce dob zdržení $E(t)$ vyhodnocením podle výše uvedeném vztahu.

Vhodně zvolený indikátor, který se pohybuje a zúčastňuje sledovaného procesu stejným způsobem jako označený materiál se nadávkuje do proudu vstupujícího materiálu a odezva se zjišťuje registrací koncentrace indikátoru na výstupu materiálu ze zařízení.

Použijeme-li jako indikátoru látku emitující ionizující záření, můžeme sledovat odezvu tj. časovou změnu koncentrace indikátoru přes stěny zařízení, takže měření s detektory přiloženými na vhodně zvoleném místě je velmi jednoduché a nevyžaduje speciální úpravy na sledovaném zařízení.

Možnost označení a sledování jednotlivých frakcí polydispersních partikulárních látek umožňuje dále získat cenné informace o složitých procesech ke kterým dochází na př. v rotačních pecích. Další výhodou je, že odezvu lze sledovat současně s několika detektory takže při jediném dávkování můžeme zjistit kromě odezvy

celého souboru i odezvy jednotlivých aparátů. Aplikace těchto indikátorů v průmyslu a metody zpracování výsledků měření jsou podrobně popsány v monografii z roku 1990 ¹⁾.

Na druhé straně použití látek emitujících ionizační záření jako indikátoru pohybu materiálu v průmyslu vyžaduje speciální přípravu v nukleárním reaktoru, dále přepravu a zpracování podle nového atomového zákona. Dodržování zákonem předepsaných podmínek, (které odpovídají plně doporučením Mezinárodní Atomové Agentury (IAEA Vídeň²⁾) je plně v kompetenci a zodpovědnosti servisní měřicí skupiny ČVUT

V průmyslové praxi je důležité získat nejen hodnotu zádrže za určitých podmínek, ale i informaci o tom, jak se tato veličina mění se změnou kvality materiálu nebo se změnou technologických podmínek.

V příspěvku jsou uvedeny jak vztahy pro zádrž materiálů, které využívají publikované výsledky experimentální práce na poloprovodním zařízení s dvaceti druhy sypkých materiálů při souprůdném i protiprůdném uspořádání materiálu a plynu, tak i postupy pro jejich využití pro průmyslové jednotky.

Z celé řady aplikací rotačních bubnů jsou však podmínky platnosti rovnice (1) splněny jen při transportu, chlazení, či ohřevu materiálu, tj. jen tehdy, když nedochází k významnější kondenzaci či odpařování kapalně fáze.

Při relativně malých změnách průtoku materiálu vstupujícího do systému, můžeme zádrž Z hodnotit použitím transformace $z(t) = \int_0^t \dot{M}_s(\tau) d\tau$ na základě vztahu ³⁾:

$$Z = \frac{\int_0^{\infty} zE(z) dz}{\int_0^{\infty} E(z) dz} \quad (2)$$

Transformační proměnná z udává hmotnost proteklého materiálu v čase t (pokud by byl hmotnostní průtok konstantní, proměnná z by byla přímo úměrná času t a vztahy (1) a (2) by se ztotožnily). Použití uvedené transformace k výpočtu zádrže na základě impulsní odezvy $E(t)$ změřené při časově *proměnném* (a známém) průtoku je oprávněné jen tehdy, když se charakter toku materiálu nemění (odtud plyne výše uvedený požadavek na nepřilíš velké změny průtoku). Tato situace bude blíže analyzována v kapitole 2.

Pokud je na druhé straně hmotnostní průtok a rychlost pohybu materiálu v čase konstantní, ale mění se po *délce* bubnu jako důsledek procesů odehrávajících se v peci, určí se zádrž integrací dle vztahu

$$Z = \int_0^L \frac{\dot{M}_s(l)}{v(l)} dl \quad (3)$$

kde L je délka bubnu, a $v(l)$ [m/s] je střední rychlost pohybu materiálu ve směru osy bubnu ve vzdálenosti l od vstupu (předpokládáme-li pístový tok materiálu, udává podíl $\dot{M}_s(l)/v(l)$ kilogramy materiálu na jednotku délky bubnu).

Stanovení zádrže v tomto případě vyžaduje informace o změně průtočného množství a rychlosti materiálu po délce pece.

¹⁾Thýn J.: "Analýza a diagnostika technologických procesů nukleární " technikou" SKAE, Praha 1990

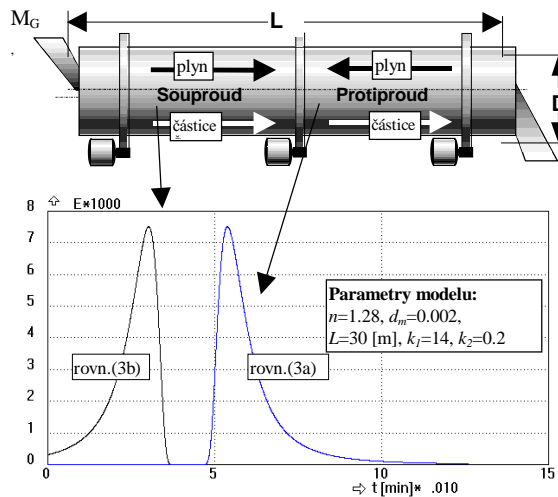
²⁾Safety regulation IAEA 1990

³⁾Žitný R., Thýn J.: Residence Time distribution Software Analysis; Computer Manual Series No.11 User's Manual| IAEA, Vienna 1996

Rychlost pohybu materiálu $v(l)$ se podobně jako střední doba zdržení určí experimentálně metodou vzruchu a odezvy opět s indikátorem emitujícím ionizující záření. Vhodně zvolený a vhodně nadávkovaný indikátor umožní sledovat pohyb materiálu přes stěny bubny, pomocí detektorů rozmístěných ve známých vzdálenostech od vstupu materiálu do pece.

Experimentální získání potřebných informací a hodnocení zádrže na provozní peci za těchto podmínek je uvedeno v kapitole 3.

2. Zádrž při konstantním průtoku i rychlosti materiálu podél bubny.



Obr.1 $E(t)$ v horizontálním rotačním bubnu

Typický rotační horizontální buben, který je znázorněn na Obr.1, charakterizuje doba zdržení materiálu, která závisí na charakteristickém rozměru zpracovávaného materiálu d , což je obvykle t.zv. Sauterův průměr částic. Pro **protiproudé** uspořádání tuhé fáze a plynu lze odvodit následující vztah⁴:

$$\leftarrow \rightarrow t = L \left(\frac{0.23}{\text{tg} \alpha N^{0.9} D} + \frac{3 \dot{M}_G}{\sqrt{d} \dot{M}_S} \right) = L \left(k_1 + \frac{k_2}{\sqrt{d}} \right) \quad (4a)$$

nebo pro souprroud

$$\rightarrow \rightarrow t = L \left(\frac{0.23}{\text{tg} \alpha N^{0.9} D} - \frac{3 \dot{M}_G}{\sqrt{d} \dot{M}_S} \right) = L \left(k_1 - \frac{k_2}{\sqrt{d}} \right) \quad (4b)$$

První člen na pravé straně zachycuje rychlost materiálu jako výsledek otáčení šikmo uloženého bubnu. Zatím co druhý člen reprezentuje pohyb, který je způsoben nosným médiem tj. dávkovaným plynem. Koeficienty k_1 , k_2 závisí na průměru D a úhlu sklonu bubnu α , frekvenci otáčení N , na množství procházejícího materiálu a plynu atd., ale jsou *nezávislé* na velikosti částic. Když při průchodu materiálu pecí nedochází k axiálnímu promíchávání lze čas t vypočítaný podle rovnic (4) považovat za střední dobu prodloužení monodispersních částic.

Obvykle se však v bubnech zpracovává polydispersní směs částic, kterou charakterizuje frakční distribuční funkce velikosti částic $f(d)$. Běžně se v praxi používá t.zv. Rosin-Rammlerova distribuční funkce:

⁴ Friedman F., Marshall A., *Chem. Engng. Progr.* 45,482, 1949

$$f(d) = \frac{nd^{n-1}}{d_m^n} \exp[-(\frac{d}{d_m})^n] \quad (5)$$

kteřá je určena dvěma parametry, středním průměrem částic d_m frakční distribuce a exponentem n , který charakterizuje rozptyl (šíři) RR distribuce.

Za předpokladu, že částice nestejné velikosti se pohybují bubnem nezávisle s rychlostmi které vyplývají ze vztahů (4) tj. jako paralelní proudy, lze odvodit následující vztahy pro impulsní odezvu (rozložení dob prodlení) částic procházejících bubnem v protiproudu s plynem, kdy platí $t > k_1 L$

$$\leftarrow \rightarrow E(t) = \frac{2n}{Lk_2 d_m^n} (\frac{Lk_2}{t - Lk_1})^{2n+1} \exp[-(\frac{Lk_2}{t - Lk_1})^{2n} \frac{1}{d_m^n}], \quad (6a)$$

a podobně pro soupproud, kdy platí, že $t < k_1 L$

$$\rightarrow \rightarrow E(t) = \frac{2n}{Lk_2 d_m^n} (\frac{Lk_2}{Lk_1 - t})^{2n+1} \exp[-(\frac{Lk_2}{Lk_1 - t})^{2n} \frac{1}{d_m^n}] \quad (6b)$$

Je třeba zdůraznit, že střední dobu zdržení nelze získat výpočtem času pro střední velikost částic d_m dle vztahů (4), protože chyba takové aproximace

$$\leftarrow \rightarrow \bar{t} = L(k_1 + \frac{k_2}{\sqrt{d_m}}) \quad (7)$$

může být značná. Správná hodnota střední doby zdržení se určí integrací definičního vztahu s použitím rovnice (6). Pro protiproudé uspořádání se získá vztah

$$\bar{t} = L[k_1 + \frac{k_2}{\sqrt{d_m}} \Gamma(1 - \frac{1}{2n})] \quad (8a)$$

kde $\Gamma(x)$ je gama funkce.

Equivalentní rovnici pro soupproud, tj. rovnici (8a) se záporným znaménkem před konstantou k_2 , lze použít pouze tehdy, když je vliv únosu plynem velmi malý.

V obecném případě se doporučuje použít následující aproximace:

$$\rightarrow \rightarrow \bar{t} = Lk_1 G_b, \quad G_b = 1 - Ke^{K^{2n}} [\Gamma(1 - \frac{1}{2n}) - \frac{1 - e^{-K^{2n}} (1 - \frac{K^{4n}}{8n-2})}{K(1 - \frac{1}{2n})}] \quad (8b)$$

kde jako pomocný parametr bylo použito $K = \frac{k_2}{k_1 \sqrt{d_m}}$. (9)

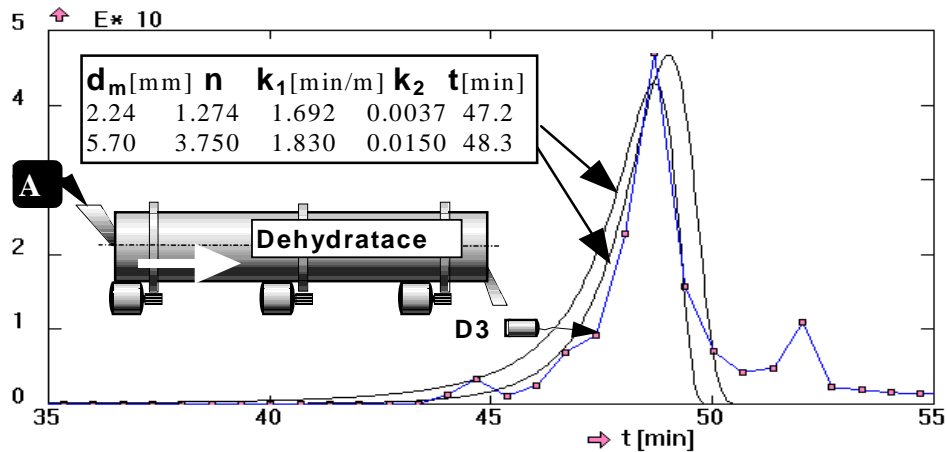
Významné rozdíly mezi dobou zdržení pro soupproud a protiproud jsou zřejmé z obrázku 1. Tento rozdíl vyplývá ze skutečnosti, že oblast dob zdržení t se pro soupproudé uspořádání mění z 0 ke konečné hodnotě $t_{max} = k_1 L$ a ne k nekonečnu (podle rovnice (4b) může doba zdržení pro velmi jemné částěčky být záporná!).

Postup hodnocení experimentů

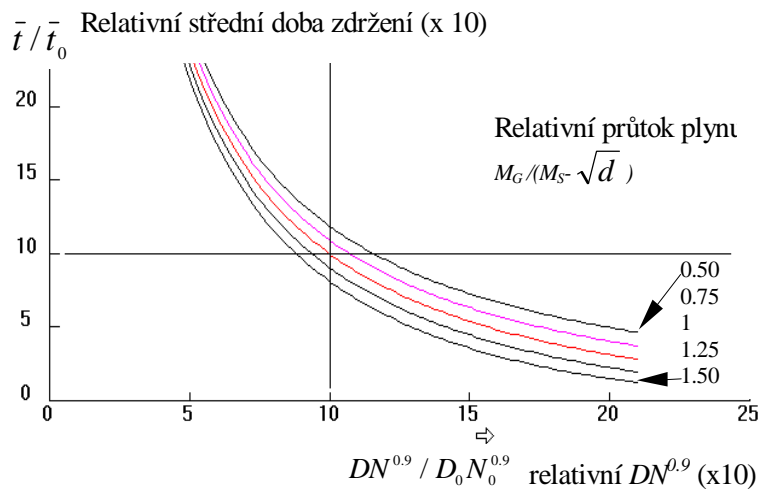
Nejprve se provede síťová analýza částic materiálu, přicházejících do bubnu a vypočtou se parametry Rosin Rammlerova rozdělení velikosti částic, tj. d_m a n . V další fázi se vyhodnotí experiment, při kterém bylo použito vhodně zvoleného indikátoru metodou vzruchu a odezvy, tj. stanoví se rozložení dob prodlení $E(t)$. Následuje identifikace neznámých konstant k_1 a k_2 pomocí vztahů pro střední dobu zdržení a rozptyl rozložení dob

prodlení podle uvedeného modelu. Výsledky získané měřením na dehydratační peci za předpokladu, že úbytek hmotnosti materiálu je zanedbatelný, jsou uvedeny na obr.2.

Experimentálně stanovené konstanty k_1 , k_2 se mohou použít pro odhad střední doby prodlení a následně i pro odhad zádrže pro mírné změny otáček bubnu N , průměru bubnu D , relativního hmotového průtoku plynu M_G/M_S nebo rozměru střední velikosti částic. d_m při použití rovnic (4). Stačí nahradit numerické konstanty (0.23, 3) v rovnicích (4) odpovídajícími hodnotami konstant přepočítanými z k_1 , k_2 pro příslušnou pec. Příklad závislosti relativní střední doby zdržení na operačních parametrech D_0 , N_0 , d_{m0} je znázorněn na obr. 3, který byl vyhodnocen z experimentů, jimž odpovídají parametry $k_1=2.215$, $k_2=0.0416$, $d_m=0.0057$ a $n=3.75$.



Obr.2 Dehydratační pec ; Stanovení konstant z naměřené $E(t)$



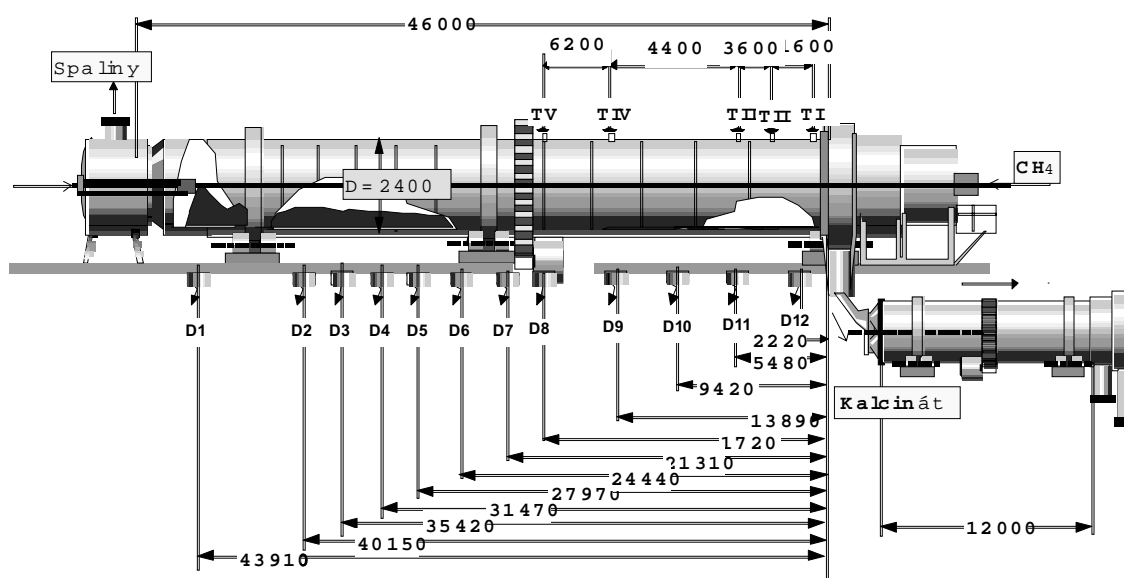
Obr.3 Střední doba zdržení, operační parametry

3. Průtok i rychlost materiálu se mění podél bubnu, ale nezávisí na čase.

Jak je uvedeno v předcházející části, za konstantního hmotnostního průtoku je zádrž dána součinem střední doby zdržení a hmotnostního průtoku. V bubnu se však často odehrávají procesy, které mění hmotnostní průtok podstatným způsobem. Např. v kalcinační peci při výrobě pigmentů odchází se spalinami až 60% hmoty vlivem odpařování a chemických a fyzikálních reakcí. Hmotnostní průtok se po délce pece mění podle toho jak a kde k odpařování resp. k reakcím dochází. Když budeme předpokládat, že k podstatné změně

průtoku dojde až na konci pece, bude vypočítané množství zádrže materiálu např. 60t (pro střední dobu prodloužení v peci kolem 13 hod.). Budeme-li naopak předpokládat změnu průtoku na začátku pece bude (pro stejnou dobu zdržení) zádrž v peci jen 24 t.

Procesy v peci také ovlivňují vlastnosti materiálu a podmínky pro jeho transport, což se projeví změnou rychlosti pohybu materiálu. Z uvedeného vyplývá, že pro věrohodné stanovení zádrže musíme znát závislost průtoku $\dot{M}_s = f_M(l)$ střední doby zdržení $t_{str} = f_t(l)$ na délce pece. Změnu průtoku podél pece nelze experimentálně určit přímo. Pro její odhad je třeba získat informaci o změně takové veličiny, která změnu průtoku ovlivňuje a která je snadno zjistitelná. Takovou veličinou je teplota povrchu pece o které předpokládáme, že kopíruje teplotu materiálu.



Obr.4 Měření rychlosti posuvu materiálu v kalcinační peci

Hodnocením úbytku hmotnosti vzorku materiálu po nekonečně dlouhém zahřívání vzorku při teplotě 90-100 °C získáme údaj o množství odpařitelné vody. Dalším postupným zvyšováním teploty až na teplotu kalcinace se zjistí závislost úbytku hmoty na teplotě (vlivem fyzikálně-chemických reakcí). Můžeme-li odhadnout průběh teploty materiálu podél pece, můžeme stanovit úbytek hmoty v určitém místě pece, tj. i lokální průtok materiálu $\dot{M}_s(l)$. Pro nedostatek přesnějších údajů se často musíme spokojit s předpokladem, že teplota materiálu v peci sleduje změny teploty získané měřením na povrchu pece.

Pro přírůstek zádrže na jednotku délky pece $\dot{M}_s(l)/v(l)$, viz rovnice (3), je třeba stanovit rychlost posuvu materiálu $v(l)$,

$$\frac{dZ}{dl} = \frac{\dot{M}_s(l)}{v(l)} = \dot{M}_s(l) \frac{dt_{str}}{dl}, \quad (10)$$

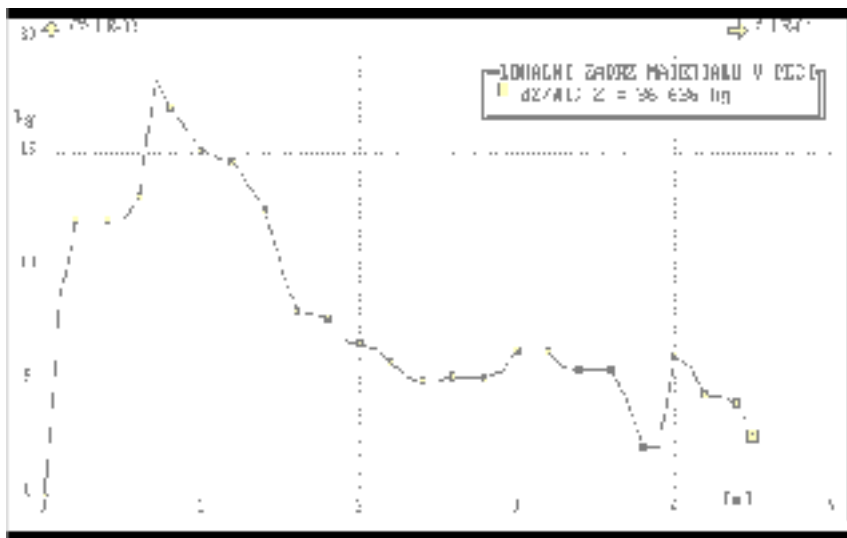
kde t_{str} je střední doba zdržení ve vzdálenosti l . Protože v peci nedochází k významnému podélnému promísení materiálu může se předpokládat, že rozdíl časových maxim t_{max} závislostí koncentrace indikátoru nastříknutého na vstupu materiálu do pece získaných měřeními detektory mezi dvěma měřicími místy, odpovídá střední době zdržení materiálu mezi těmito místy. Tímto způsobem můžeme pro každý metr pece přisoudit časovou změnu tj. $dt_{str}/dl \approx (\Delta t_{max}/\Delta l)_i$. Dosazením do rovnice (10) tedy plyne

$$\frac{dZ}{dl} \cong (\dot{M}_s \frac{\Delta t_{\max}}{\Delta l})_i \quad (11)$$

Celkové množství materiálu v peci tj. celková zádrž Z se získá součtem

$$Z = \int_0^L \frac{dZ}{dl} dl \cong \sum_i (\dot{M}_s \Delta t_{\max})_i \quad (12)$$

Závislost lokální zádrže, která je znázorněna na obr. 5 se získala vyhodnocením měření s radioaktivním indikátorem a měřením teplot povrchu pece po délce pece v místech která jsou uvedena na obrázku 4.



Obr. 5 Změna lokálního množství materiálu na jednom metru délky pece (dZ/dl) po délce pece a vypočítaná celková zádrž - Z -materiálu v peci .

Poděkování -

Práce byla provedena v rámci projektu RC 10051 s podporou International Atomic Energy Agency a grantu institucionálního výzkumu J04/98:212200008.