

TERMOAKUSTICKÉ EXPERIMENTY NA PÁDOVÉ TRUBCE

Petr ŠTĚPÁNEK^{1,2}, František HRDLIČKA², Vladimír MĚCHURA¹

¹ MORE, s.r.o. Podnikatelská 267, Praha 9

² Fakulta strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6, e-mail: petr.stepanek@fs.cvut.cz

Cílem předkládaného příspěvku je kvantifikovat a následně zhodnotit vybrané vlastnosti zrn uhelného prášku a vliv jejich změn v závislosti na době strávené v pádové trubce. Všechny experimenty a závěry zde publikované se vztahují k hnědouhelnému prášku z lomu Libouš a pádové trubce instalované v laboratoři VEC při VŠB-TUO. Dále jsou zde popsány vlastnosti atmosféry pádové trubky a jejich změny během experimentu. V příspěvku je diskutován předpoklad, že intenzifikací relativního pohybu zrna uhelného prášku vůči okysličovacímu se zintenzivní přenos tepla a hmoty, důsledkem čehož se zvýší rychlost vyhořívání hořlaviny obsažené v zrně. Podmínky zrychlení vyhořívání jsou simulovány a kvantifikovány experimenty provedenými na pádové trubce za standardních podmínek a posléze se superpozicí hluku, čímž došlo ke vzniku tzv. „syntetizovaného proudění“. Následující příspěvek prezentuje podmínky i výsledky měření. Byl sestaven zjednodušený matematický model vzájemného pohybu složek disperze a provedena diskuze nad výsledky.

Klíčová slova: pádová trubka, vyhořívání hnědouhelného prášku, syntetizované proudění.

Došlo 13. 4. 2016, přijato 16. 10. 2016

1. Úvod

Matematická interpretace vyhořívací křivky je jedním z parametrů CFD modelu spalování uhelného prášku. Prostředkem k získání dat vyhořívací křivky je pádová trubka. Aby bylo možné namodelovat průběh vyhořívání, je třeba co nejpřesněji znát počáteční i okrajové podmínky experimentálního měření bodů vyhořívací křivky. Tyto podmínky se v průběhu experimentu mohou měnit, což lze mnohdy zanedbat.

Obecný proud tekutiny vystavený působení hluku je označován termínem syntetizované proudění, podrobněji v literatuře [1, 2]. Motivace k aplikaci syntetizovaného proudění v reaktoru pádové trubky (dále jen reaktoru) byla popsána v literatuře [3]. Předpokládá se, že aplikací syntetizovaného proudění se podmínky experimentálního měření více přiblíží podmínkám v reálném ohništi velkoprostorového kotle, v němž je uhlí spalováno ve formě jemně mletého prášku.

Okysličovadlem a současně nosnou látkou uhelného prášku je reakční plyn – směs vzduchu a CO₂. Charakter změn termodynamických stavů lze považovat za adiabatický. Použitým palivem je hnědouhelný prach z lomu Libouš. Vliv termodynamického stavu reakčního plynu stejně jako vliv objemové koncentrace c_{O₂} v reakčním plynu na Reynoldsovo porovnávací kritérium, potažmo elementární představa o charakteru proudění byla prezentována v literatuře [3].

2. Diskuze nad metodikou experimentů

Schéma pádové trubky včetně dále popsáných zařízení je na obrázku 1. Samotný reaktor, jak bude v dalším textu těleso pádové trubky označováno, představuje vertikálně uložená skořepina kruhového průřezu o vnitřním průměru 66.10⁻³ m, tloušťce stěny 4.10⁻³ m a délce 4,8 m. Materiálem trubky je slitina známá pod obchodním názvem Kanthal APM. První představu o účelu a podobě

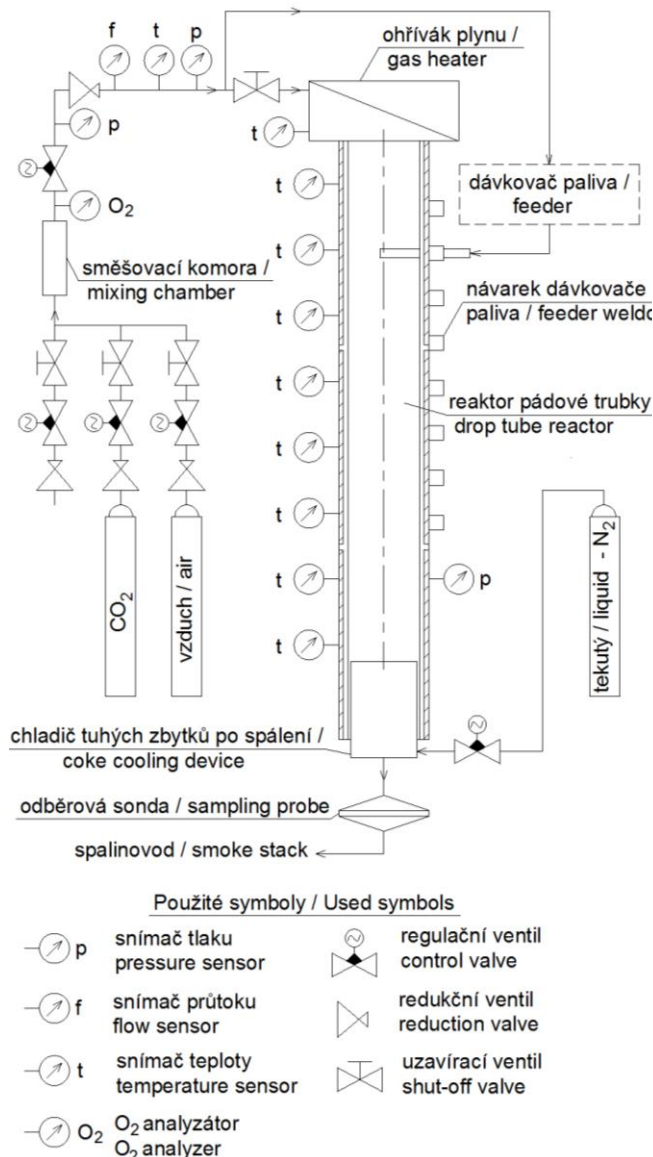
pádové trubky si lze udělat z literatury [4, 5]. Na tomto zařízení se již bezmála 10 let provádějí termokinetická experimentální měření vyhořívání uhelného prášku, jejichž grafickou interpretací vzniknou vyhořívací křivky. Možnosti podmínek experimentálních měření jsou následující:

- teplota: $t \in (600; 1100)^\circ\text{C}$,
- objemová koncentrace O₂: $c_{\text{O}_2} \in (0; 21)\% \text{ obj.}$,
- objemový průtok reakčního plynu: $V_{\text{RP}} \in (13; 22) \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, což přibližně odpovídá rozsah střední rychlosti proudu po průtočném průřezu: $w_{\text{RP}} \in (1; 4) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,
- hmotnostní průtok paliva: $m_{\text{PAL}} \in (1,5; 15) \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,
- zrnitost zkoušeného souboru zrn: $Z \in (32; 300) \cdot 10^{-6} \text{ m}$.

2.1. Charakter surového paliva

Pro ilustraci bylo zvoleno tuzemské hnědé uhlí z lomu Libouš, protože s tímto palivem byla provedena mnohá měření. Ilustračním příkladem může být výzkumná zpráva [6]. Další motivací pro volbu tohoto paliva je fakt, že palivo je zauhlováno kromě jiných i na nově komplexně obnovené bloky Elektrárny Tušimice II a Elektrárny Pruněřov II. Jedná se o povrchově těžené „energetické“ hnědé uhlí o nízké výhřevnosti s relativně vysokým obsahem popelovin i obsahu vody v palivu. V souvislosti se zvolenou klasifikací lze o tomto uhlí tvrdit následující:

- vzhledem ke stupni prouhelnění (tj. poměru C_v/H_y) a podílu prchavé složky hořlaviny V^{daf} se podle Seylerovy klasifikace jedná o „mdlý lignit“ [7],
- v souladu s chemickým složením hořlaviny se podle kategorizace československých uhlí jedná o hnědé uhlí typu „L“ [7].



Obr. 1 Schéma pádové trubky instalované na VEC při VŠB-TUO v Ostravě (podrobněji viz [6])

Fig. 1 Scheme of drop tube furnace installed in VEC VŠB-TUO in Ostrava (for details see [6])

Tab. 1 Rozbor hnědého uhlí z lomu Libouš [6]

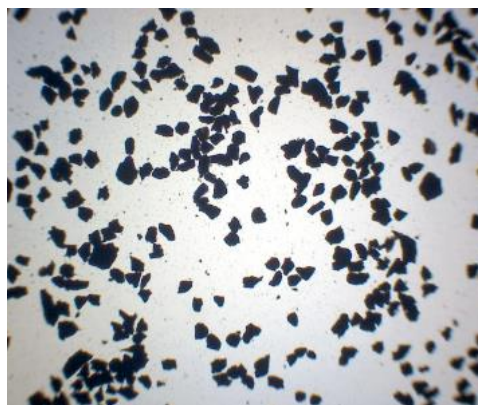
Tab. 1 Analysis of lignite mined in Libouš mine [6]

| Složka (Compound) | Koncentrace (Concentration) | | |
|----------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|
| | Analytický (Raw) | Bezvodý (Dry) | Hořlavina (Dry Ash Free) |
| A | 28,29 | 41 | - |
| H | 2,32 | 3,36 | 5,71 |
| C | 26,36 | 38,2 | 64,76 |
| S | 1,99 | 2,88 | 4,90 |
| N | 0,48 | 0,7 | 1,18 |
| O | 9,55 | 13,84 | 23,45 |
| W | 31 | - | - |
| V | 22,39 | 37,95 | 55 |

Složení paliva je uvedeno v tabulce 1. Pro účel experimentů v reaktoru je palivo předsušeno na obsah vody ve vzorku menší než $W \sim 3\%$. Surové palivo zrnitosti přibližně odpovídající ořechu bylo rozemleto na prášek v těžké laboratoři zmiňovaného pracoviště na čelistovém mlýně Brio BCD-3. Vytřídění jednotlivých frakcí souboru uhelných zrn bylo provedeno na střešacím aparátu ASTM 300 výrobce Retsch používaném pro analýzu rozsevu na sítích. Zdánlivá měrná hmotnost uhelné substance včetně pórů byla stanovena $\zeta_{PAL} = 1280 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ metodou převzatou z literatury [8].

2.2. Monodisperznost prášku

Je-li takto získaný soubor zrn vizuálně kontrolován pod mikroskopem, jsou patrné částice řádově menších rozměrů vůči zrnům, která byla cíleně získána, viz obrázek 2.



Obr. 2 Ilustrační obrázek souboru zrn o velikosti 56 až $80 \cdot 10^{-6} \text{m}$ po síťování [6]

Fig. 2 Example of lignite particles suite by granulometry (56; 80). 10^{-6}m after dry sieving and before air washing [6]

Přítomnost většího množství těchto jemných částic je vzhledem k dalšímu zpracování souboru zrn krajně nežádoucí. Ideální vzorek uhelného prášku pro účel experimentů na pádové trubce je tvořen monodisperzním souborem zrn. Za kvalitativní měřítko monodisperznosti souboru zrn lze považovat exponent n [-] z Rosin-Rammlerova vztahu pro poměrné množství zrn R_x [$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$] o rozměru větším než x [m]. Za předpokladu, že jsou známy 2 body rozsevové křivky, lze vyjádřit exponent n [-] následujícím vztahem:

$$n = \frac{\log(\ln R_1 - \ln R_2)}{\log\left(\frac{x_2}{x_1}\right)} \quad [-] \quad (1) \quad [5].$$

Nutné podmínky platnosti rovnice (1) lze shrnout:

$$R_{1;2} \neq 0 \quad \wedge \quad R_1 > R_2 \quad \wedge \quad x_1 < x_2.$$

První z uvedených podmínek lze splnit vhodnou volbou bodů rozsevové charakteristiky. Rozsevové charakteristiky vzorků odebíraných v práškovodech převážně tuzemských kotlů naznačují, že v případě ventilátorových mlýnů se hodnota exponentu n pohybuje nejčastěji v intervalu $n \in (1; 2)$. Čím vyšší hodnoty expo-

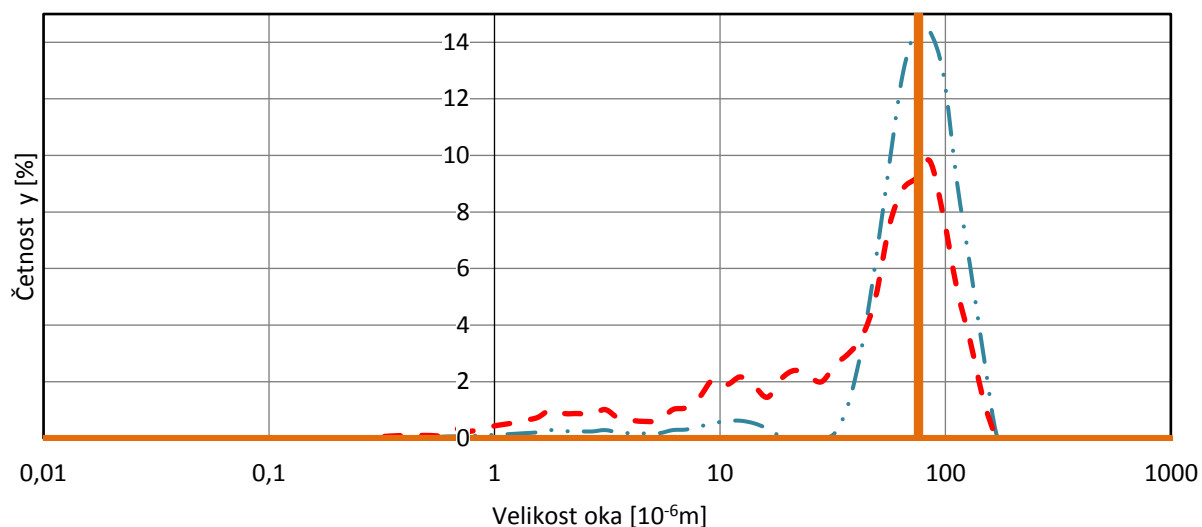
ment n nabývá, tím více se daný soubor zrn blíží monodisperznímu. Pro zvýšení exponentu n se provádí promytí souboru zrn proudem vzduchu. Výsledným efektem je snížení četnosti zrn řádově menších, než je žádaná zrnitost. Ilustrační příklad možnosti zvýšení monodisperznosti touto procedurou je uvedeno na obrázcích 3 a 4. Na obrázcích 3 a 4 reprezentuje červená linka – stav souboru před promytím, modrá linka - stav po promytí, oranžová linka – ideální monodisperzní soubor. Křivka četnosti monodisperzního souboru připomíná Diracův impulz konečné výšky o hodnotě právě 100 %, což vychází mimo zvolený rozsah grafu na obrázku 3. Získat reprezentativní granulometrický rozbor souboru zrn blížících se svými vlastnostmi monodisperznímu je náročnější. Je totiž zapotřebí velkého počtu sít. V praxi se tento problém mnohdy řeší použitím jiné metody. Např. na pracovišti VEC při VŠB-TUO byly rozборы kvazi-monodisperzních souborů řešeny následovně:

- Do roku 2015 prováděno formou subdodávky od Fakulty chemicko-technologické Univerzity Pardubice na přístroji Malvern Mastersizer 2000 particle size analyzer.
- Od roku 2015 je prováděno pomocí přístroje Cilas 1090 v laboratoři VŠB-TUO.

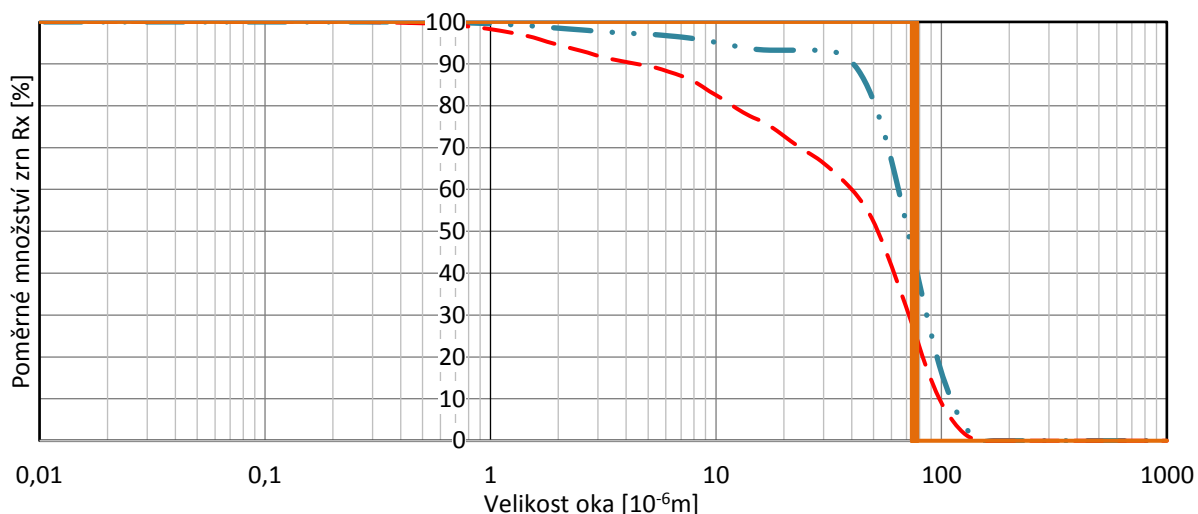
2.3. Tvarový součinitel zrn

Aby bylo možné stanovit např. odpor prostředí vůči obtékanému zrnu, je třeba mít představu o geometrickém tvaru uhelného zrna. Pro tento účel byl zaveden tvarový součinitel neboli sféricita. Sféricitu je možno chápat jako měřítko odlišnosti reálné částice mající obecný geometrický tvar od částice ideálně kulové. Matematická formulace sféricity je dána rovnicí (2):

$$\varphi = \frac{S_S}{S_R} \quad [-] \quad (2).$$



Obr. 3 Demonstrace změny křivky četnosti souboru uhelných zrn po promytí vzduchem
Fig. 3 Demonstration of influence air washing on granulometric distribution of lignite particles suite

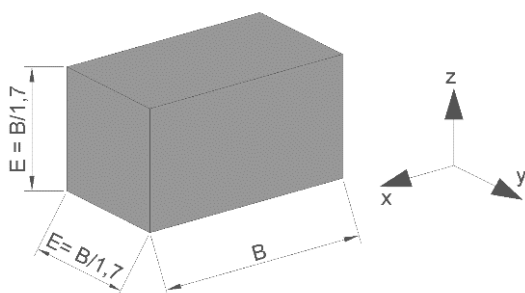


Obr. 4 Demonstrace změny křivky rozsevu souboru uhelných zrn po promytí vzduchem
Fig. 4 Demonstration of influence air washing on characteristics of seeding of lignite particles suite

Nutná podmínka platnosti rovnice (2) je: $V_S = V_R$. Na základě prací [6] lze usuzovat, že uhlí se během mletí nejčastěji dělí na zrna, jejichž sféricita je ekvivalentní kvádrů proporcí uvedených na obrázku 5.

Dosazením jednotkového poměru stran uvedených na obrázku 5 do rovnice (2) se získá průměr zrna o tvaru dokonalé koule:

$$d_R = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot E^2 \cdot B}{4 \cdot \pi}} \approx 0,871 \cdot B \quad [m] \quad (3).$$



Obr. 5 Tvar co do sféricity ekvivalentní vůči geometrickému tvaru průměrného uhelného zrna dle [9]

Fig. 5 The equivalent shape representation of lignite particle by [9]

Dosazením rovnice (3) do rovnice (2) se získá sféricita $\varphi \approx 0,78$ [6]. Černý [10] uvádí sféricitu prášků ze Sokolovského uhlí v dobré shodě s výše uvedeným rozbohem uhlí publikovaným v [9].

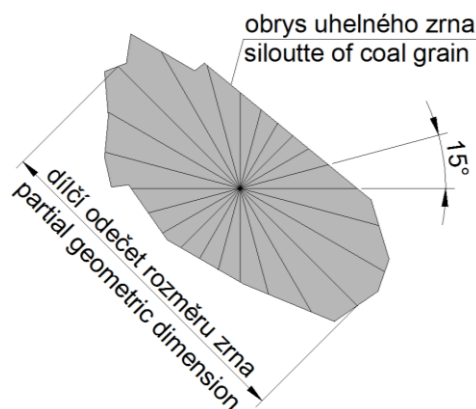
Pro demonstraci jsou v dalším textu popsány dva experimenty ilustrující tvarovou podobnost zrn uhelného prášku z dolu Libouš s tvarem na obrázku 5. Metodika byla přejata z literatury [9]. Předpokládá se, že tvar zrna se blíží tvaru kvádrů o poměru stran zobrazených na obrázku 5. Je-li takový soubor zrn v jedné vrstvě nasypán např. na Petriho misku, pak s největší pravděpodobností zaujmou zrna polohu, při níž nejdelší strana hranolu nabude vodorovného směru. Na základě výše uvedeného lze ze snímků s průměty několika zrn v jedné rovině experimentálně vyhodnotit poměr stran B/E . Byly pořízeny 4 snímky souborů zrn. Na každém snímku je v průměru 10 reprezentativních zrn dobře čitelného obrysu. Celkem bylo rozboru podrobena 42 zrn. Průmět každého z těchto zrn byl podroben níže popsanému rozboru:

- Kvalifikovaným odhadem bylo stanoveno těžiště plochy průmětu.
- Těžištěm byla proložena vodorovná přímka. Následně bylo těžištěm proloženo dalších 12 přímek se vzájemným fázovým posuvem $\alpha = 15^\circ$.
- Každá přímka protne obrys ve 2 bodech, vzdálenost mezi těmito 2 body představuje dílčí rozměr uhelného zrna d_i .

Aritmetický průměr 2 až 4 nejkratších rozměrů d_i lze označit za stranu čtvercové podstavy kvádrů E [m] v souladu s předpokládaným tvarem, viz obrázek 6. Aritmetický průměr 2 až 4 nejdelších rozměrů d_i lze označit za délku hranolu B [m] v souladu s předpokládaným tvarem, viz obrázek 5.

Na základě literatury [9] by vzájemný vztah těchto rozměrů měl být:

$$B = 1,7 \cdot E \quad (4).$$

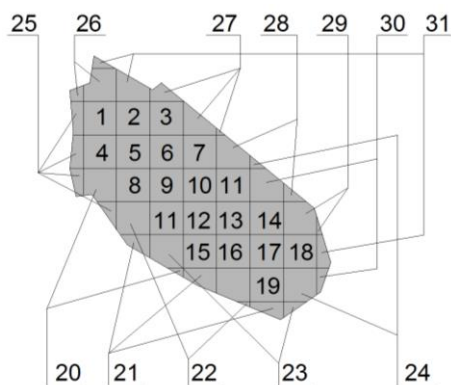


Obr. 6 Ukázka stanovení dílčích rozměrů zrn

Fig. 6 Example dimensional analysis of lignite particle

Na základě odečtu rozměrů E a B bylo možno stanovit jejich vzájemný vztah, potažmo zhodnotit jak moc se vybraná zrna blíží aproximaci popsané rovnicí (4). Podíl B/E byl odečten pro všech 42 zrn. Aritmetický průměr byl: $\bar{B}/\bar{E} = 1,64$, hodnoty jednotlivých zrn ležely na intervalu: $B/E \in (1,26; 1,98)$. Podobnost geometrie zrn použitých v experimentu s rovnicí (3) se jeví relativně dobrá.

Další metodou stanovení sféricity je metoda Hornického ústavu ČSAV [10]. Během tohoto experimentu byl průmět zrna překryt pomyslnou sítí. Rozměr oka sítě byl zvolen adekvátně vůči velikosti zrna. Vlivem nepravidelného obrysu byly okrajové čtverce sítě jen částečně překryty. Plochy těchto elementů byly kvalifikovaným odhadem sečteny v celé čtverce, viz obrázek 7.



Obr. 7 Stanovení plochy průmětu zrna

Fig. 7 Analysis of projection area of lignite particle

Součet všech těchto čtverců reprezentuje plochu průmětu zrna S_1 . Následně byla tímto způsobem stanovena plocha zrna v dalším průmětu S_2 . Sféricita je pak rovna odmocněnému podílu ploch dvou průmětů:

$$\text{Platí-li: } S_1 < S_2, \text{ pak } \varphi = \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} \quad [-] \quad (5A).$$

$$\text{Platí-li: } S_2 < S_1, \text{ pak } \varphi = \sqrt{\frac{S_2}{S_1}} \quad [-] \quad (5B).$$

Sféricita φ byla spočtena pro všech 42 zrn, aritmetický průměr je: $\bar{\varphi} = 0,8$. Hodnoty sféricity jednotlivých zrn ležely na intervalu: $\varphi \in (0,71; 0,91)$.

Na základě obou výše popsaných experimentů lze tvrdit, že zrna experimentu podrobeného souboru se svým geometrickým tvarem více blíží tvaru dokonalé koule než soubor vyšetřovaný v literatuře [9]. Pro účel dalších výpočtů bude uvažována $\varphi = 0,8$.

2.4. Vliv popelovin

Čím bude obsah popela A^d uhlí vyšší, tím významnější roli bude popel během spalování hrát. Vyšší A^d může mít za následek spékání povrchu uhelného zrna, čímž se sníží porozita povrchu zrna, důsledkem čehož dojde ke zpomalení přenosu tepla a hmoty soustavy zrno/reakční plyn, potažmo snížení rychlosti vyhořívání.

2.4.1 Nehomogenita rozložení popelovin

Mezi lety 1983 až 1987 provedl Měchura sérii experimentálních měření na pádové trubce instalované v areálu VÚ Běchovice za účelem stanovení reaktivity uhelných prášků [11]. Ziskal charakteristiky vzorků všech tuzemských uhelných pánví od Sokolova až po Horní Nitru. Vzájemné porovnání charakteristik je možné, pokud je obsah popelovin v uhelných zrnech porovnávaných vzorků srovnatelný. Právě v distribuci popelovin v různých velikých zrnech došel Měchura zásadního zjištění. Použitá řada středních zrnění zkoušených souborů byla: (34, 72, 142) 10^{-6}m . Zrno uhlí o velikosti ořechu se rozemletím na zrna velikosti (0; 200) 10^{-6}m rozčlení na zrna, v nichž významnou měrou převládá hořlavina a zrna tvořená jenom popelovinami. Toto tvrzení potvrdil pozorováním pod mikroskopem a následným rozbohem.



Obr. 8 Zrna uhlí a popelovin velikosti (56 až 80). 10^{-6}m
Fig. 8 Ash and lignite particles (56; 80). 10^{-6}m

Byla provedena vizuální kontrola souboru zrn pod mikroskopem, čímž se prokázala platnost tohoto tvrzení. Vypnutím podsvícení se záběr snímáný na obrázku 2 změnil na záběr na obrázku 8. Zrna tvořená čistě popelovinami mohou být v závislosti na jejich složení snadno rozpoznatelná. Např. SiO_2 , tj. křemen je průsvitný, viz

obrázek 8. Zelenými ovály jsou označena uhelná zrna, zatímco červenými ovály zrna tvořená popelovinami.

Obecně lze tvrdit, že obsah popelovin v zrně a jejich složení má nezanedbatelný vliv na rychlost vyhořívání. Zrna tvořená popelovinami projdou reaktorem, aniž by se zúčastnila spalovacího procesu. Zrna o obsahu popelovin identickém jako analytický vzorek budou vyhořívát pomaleji než zrno, z něhož se část popelovin oddělila během mletí. Měchura proto zavedl přepočít klasicky stanoveného obsahu popela ve vzorku A^d [%] na obsah popela v zrnech A'^d [%]. Přepočít byl stanoven experimentálně, totiž vizuálním rozbohem souboru o 300 až 400 zrnech. Během rozborů byly odečteny:

- počet všech zrn m [-],
- počet zrn tvořených jenom popelovinou n [-].

Obsah popela souboru jemně mletých uhelných zrn se při známém obsahu popela uhlí v suchém stavu A^d podle Měchury stanovuje následujícím vztahem:

$$A'^d = \frac{(m \cdot A^d) - n}{(m - n)} \quad [\%] \quad (6).$$

Výsledky přepočtu obsahu popela v zrnech nabývají pro hnědé uhlí z dolu Libouš hodnot uvedené v tabulce 2. Z rozborů uhlí všech československých pánví plyne, že: $A'^d / A^d < 1 \Rightarrow A^d > A'^d$. Závislost hodnoty podílu A'^d / A^d na zrnitosti je rostoucí.

Tab. 2 Porovnání obsahu popela v zrnech s obsahem popela v analytickém vzorku v závislosti na střední zrnitosti [11]

Tab. 2 Comparison of lignite particles ash content with sample of lignite ash content, both dependent on particle dimension [11]

| Střední zrnitost souboru [10^{-6}m] | A^d [%] | A'^d [%] | A'^d / A^d [-] |
|---|--------------|---------------|---------------------|
| 34 | 36,11 | 31,37 | 0,869 |
| 72 | 33,6 | 31,21 | 0,929 |
| 142 | 40,23 | 39,11 | 0,972 |

2.5. Reakční plyn

Reakčním plynem je směs vzduchu a CO_2 . Systém umožňuje volbu široké škály plynů a současně lze směřovat až tři různé složky. Nicméně dlouhodobě je volena právě výše uvedená dvojice plynů. Motivace k použití této kombinace plynů bude demonstrována na ilustračním příkladu. Chemické složení vzducho-spalinové směsi vzniklé dokonalým spálením jednoho kilogramu hnědouhelného prášku z lomu Libouš se vzduchem při koeficientu přebytku vzduchu rovném 1,00 je uvedeno v tabulce 3. Z hodnot v tabulce plyne, že výsledné spaliny jsou tvořeny převážně 3 složkami: CO_2 , H_2O a N_2 . Na reálném kotli bude příprava uhelného prášku probíhat např. ve ventilátorovém nebo tlukadlovém mlýně. Na kotlích tuzemských energetických zdrojů bývají tyto mlýny zařazeny do uzavřeného mlecího okruhu s přímým foukáním prášku do ohniště.

Tab. 3 Chemické složení vzducho-spalinové směsi vzniklé dokonalým spálením 1 kg uhelného prášku při koeficientu přebytku vzduchu rovném 1,00

Tab. 3 Flue gas compounds created by combustion of 1kg pulverized lignite with air by air-fuel ratio equals 1,00

| Složka | Množství | Podíl složky |
|------------------|----------------------|--------------|
| CO ₂ | 0,49 Nm ³ | 0,15 |
| SO ₂ | 0,01 Nm ³ | ~0 |
| N ₂ | 2,11 Nm ³ | 0,64 |
| H ₂ O | 0,68 Nm ³ | 0,21 |
| O ₂ | 0 Nm ³ | 0 |

Nosnou látkou zajišťující ventilaci prášku je primární směs, která se v souladu s dlouhodobě zaváděnými primárními denitrifikačními opatřeními skládá převážně ze sušících spalin, recirkulovaných spalin a neplánovaně přisávaného vzduchu vraty mlýna a dalšími netěsnostmi. Vlivem recirkulace spalin do hořákového pásma ohniště lze očekávat, že podíl CO₂ v reálném ohništi bude vyšší než ve výše uvedeném příkladu. Na základě uvedených předpokladů lze tvrdit, že složení reakčního plynu tvořeného směsí vzduchu a CO₂ je minimálně stejně blízké složení prostředí v reálném ohništi jako reakční plyn jiných reaktorů, kde reakční plyn tvoří směs vzduchu s N₂^{pozn.1}.

Poměr vzduchu a CO₂ je zpětnovazebně regulován v závislosti na hodnotě objemové koncentrace O₂. Zpětnou vazbu zajišťuje analyzátor instalovaný před vstupem do ohříváku reakčního plynu. Oba plyny jsou dávkovány z tlakových láhví, přičemž žádaná hodnota tlaku obou plynů je dosažena redukčním ventilem. Po smíšení proudí reakční plyn ohřívákem, kde je ohřát na stejnou teplotu jakou má prostředí uvnitř pádové trubky. Vše je patrné z obrázku 1.

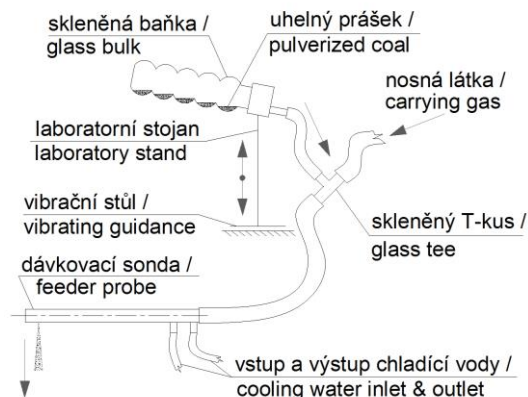
Za ohřívákem je zařazena usměrňovací mříž, jejímž úkolem je zrovnoměrnit rychlostní profil na vstupu do reaktoru. Výsledný rychlostní profil na vstupu do reaktoru se blíží profilu tzv. pístového toku. Po vstupu reakčního plynu do reaktoru je rychlostní profil v souladu s Newtonovým zákonem viskozity deformován a postupně se mění v parabolický profil charakteristický pro laminární proudění. V souladu s teorií minimální rozběhové dráhy se laminární charakter proudění rozvine nejdříve ve vzdálenosti 3 m od usměrňovací mříže [3]. Minimální rozběhová dráha je závislá na parametrech prostředí. Vliv termodynamického stavu a chemického složení reakčního plynu na charakter proudění byl prezentován v literatuře [3].

Aby bylo možno experimentálně získaná data považovat za reprezentativní, je třeba potlačit výměnu tepla mezi zrnem uhelného prášku a jeho okolím. Změny termodynamických stavů probíhajících v reaktoru by se

měly co nejvíce blížit adiabatickým změnám. Aby bylo možno se tomuto požadavku přiblížit, je vnější plášť reaktoru po celé své výšce otápen, čímž je kompenzováno sdílení tepla s okolím. Topné články typu Fibrothal RAC mají úlohu akčních členů v regulaci teploty prostředí v reaktoru. Pro zvýšení přesnosti regulace jsou topné články rozděleny po výšce reaktoru do 3 autonomně regulovaných sekcí. Po výšce reaktoru bylo instalováno celkem 8 snímačů teploty. Horní a střední sekce mají po třech snímačích a zbylé 2 snímače jsou ve spodní sekci. Tyto snímače – termočlánky s relativně nízkou časovou konstantou mají roli zpětné vazby v regulačních obvodech teploty jednotlivých sekcí. Tyto 3 regulační obvody svými zásahy zajišťují podmínky blízké adiabatickým.

2.6. Dávkování paliva

Rychlost proudění reakčního plynu je konstantní. Doba setrvání uhelného zrna v prostředí reaktoru je tedy přímo úměrná délce trajektorie, kterou uhlé zrno absoluuje. Délku trajektorie je možno ovlivnit volbou dávkovacího otvoru. Potenciálních dávkovacích otvorů je po výšce reaktoru celkem 8, viz obrázek 1. Do vybraného dávkovacího hrdla je zavedena dávkovací sonda paliva. Keramické těleso sondy má kavitu umožňující chlazení vodou. Předem stanovené množství uhelného prášku je nasypano do skleněné baňky.



Obr. 9 Systém dávkování uhelného prášku
Fig. 9 Scheme of pulverized coal feeder

Ta je umístěna v laboratorním držáku uloženém na vibračním stole. V nejnižším místě skleněné baňky je vyústění na hadičku, která je přivedena na vstup do Y-kusu. Zrna jsou tedy vibračním pohybem stolu kontinuálně střásána k vyústění baňky. Padají do Y-kusu, odkud jsou unášena malým množstvím nosné látky, kterou je reakční plyn odebraný před vstupem do ohříváku. Vše výše popsané je zřejmé z obrázku 9. Standardně probíhá experiment zaměřený na získání termokinetických vlastností vzorku uhelného prášku o hmotnosti 3 g přibližně 15 minut. Lze tedy říci, že hmotnostní průtok paliva dávkovaný do reaktoru je přibližně $m_{p,AL} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$.

¹ Reaktor s tímto složením reakčního plynu byl použit pro experimenty popsané např. v literatuře [12].

Měření vyhoření by se mělo odehrát v prostředí s konstantními podmínkami po celé trajektorii každého zrna. Následuje ilustrační příklad výpočtu změny koncentrace O_2 v průběhu vyhořívání. Pro tento účel byly uvažovány následující podmínky:

- dokonalé vyhoření,
- palivem je již zmiňované hnědé uhlí z lomu Libouš, viz tabulka 1,
- během experimentu bude mít reakční plyn parametry: rychlost $w_{RP} = 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, teplotu $t_{RP} = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$, objemovou koncentraci O_2 $c_{O_2} = 8 \text{ } \%$ obj.

Objemový průtok reakčního plynu vyjádřený jako ekvivalent průtoku vzduchu za normálních podmínek je roven:

$$\dot{V}_{VZD} = \frac{\pi \cdot d_{PT}^2 \cdot w_{RP} \cdot T_N \cdot c_{O_2}}{4 \cdot T_{RP} \cdot c_{O_2} \cdot VZD} \quad [Nm^3 \cdot s^{-1}] \quad (7)$$

Objemový průtok vzduchu potřebný k dokonalému vyhoření veškeré hořlaviny v přiváděném průtoku uhelného prášku za normálních podmínek je roven:

$$\dot{V}_{VZD_{min}} = V_{STECH} \cdot \frac{\partial m}{\partial t} \quad [Nm^3 \cdot s^{-1}] \quad (8)$$

Podíl rovnic (7) a (8) je hovorově nazýván přebytkem spalovacího vzduchu, tj.:

$$\mu = \frac{\dot{V}_{VZD}}{\dot{V}_{VZD_{min}}} = \frac{c_{O_2RP}}{c_{O_2RP} - c_{O_2}} \quad [-] \quad (9)$$

Vyjádřením c_{O_2} z rovnice (9) a následným dosazením byla získána hodnota $c_{O_2} = 7,91 \text{ } \%$ obj. Lze tedy soudit, že termokinetickým experimentem za výše uvedených podmínek dojde k úbytku O_2 o velikosti $\Delta c_{O_2} = 0,09 \text{ } \%$ obj. Podmínky demonstračního příkladu byly voleny jako kombinace nejhorších možných podmínek, které mohou nastat. Teplota termokinetického experimentu se na úbytku O_2 podílí přímou úměrou – čím vyšší teplota, tím vyšší úbytek O_2 . Pouhým snížením teploty reakčního plynu z $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ na $700 \text{ }^\circ\text{C}$ se sníží úbytek O_2 na $\Delta c_{O_2} = 0,06 \text{ } \%$ obj.

2.6.1 Vyhořívání zrn uhelného prášku

Krátce poté, co pomyslné zrno opustí ústí dávkovací sondy, je mu z okolí předáno teplo, čímž dojde k jeho ohřevu a následnému odplynění prchavého podílu hořlaviny. V rámci jednotlivých složek tvořících prchavý podíl hořlaviny uhelné substance jsou patrné rozdíly v teplotních úrovních, při nichž dochází k odplyňování i zážehu. Teplota počátku odplyňování složky, stejně jako teploty zážehu, je přímo závislá na stupni prouhelnění. Nejprve jsou odplyněny složky s nízkým stupněm prouhelnění, následují složky s vyšším stupněm prouhelnění. Výše uvedené obecně platí, nicméně přenos hmoty (prchavé hořlaviny) z vnitra zrna na jeho povrch probíhá v závislosti na vlastnostech hořlaviny a popelovin různými mechanismy, které mohou hrát zcela zásadní roli. Například nízká porozita uhelné substance zpomalí kapilární tok. Po dobu odplyňování teplota hmoty zrna roste

nízkým gradientem, který prakticky kopíruje teplotu odplynění aktuálně uvolňované složky prchavé hořlaviny. Molekuly prchavé hořlaviny směřují z vnitra zrna k jeho povrchu, kde v bezprostřední blízkosti zrna dojde k překročení zápalné teploty, následuje jejich oxidace. V bezprostředním okolí reagujícího objemu vzroste teplota prostředí. Tak jak je zrno ohříváno, jsou uvolňovány molekuly prchavé hořlaviny s čím dál tím vyšším stupněm prouhelnění. V určitém momentě dojde u každého zrna k výraznému snížení toku prchavé hořlaviny. Paralelně s poklesem průtoku prchavé hořlaviny ze zrna prudce roste teplota zbylé hmoty zrna, až dojde k zážehu pyrolýzního zbytku.

2.6.2 Změna geometrického tvaru zrna během vyhořívání

V jednotlivých výše popsaných fázích ohřevu, odplyňování prchavého podílu hořlaviny, jakož i oxidaci pyrolýzního zbytku se mění geometrický tvar i samotné rozměry uhelného zrna.

Předpokládá se, že chemické složení uhelné substance a porozita jsou v celém objemu zrna homogenní. Důsledkem tohoto předpokladu je, že pravděpodobnost oxidace hořlaviny je po celém vnějším povrchu zrna stejná. Vzhledem k výjimečnému postavení případných výčnělků zrna dochází rovnoměrným kapilárním tokem vlhkosti a prchavé složky hořlaviny, jakož i následným hořením pyrolýzního zbytku k intenzivnějšímu odhořívání těchto výčnělků. Ztrátou hořlaviny ve výčnělcích zrna dochází k deformaci, jejímž projevem je, že se geometrický tvar zrna čím dál víc blíží ideální kouli. Platnost tohoto tvrzení potvrzují výsledky publikované v literatuře [12]. Cílem těchto experimentů bylo získat závislost změny vybraných vlastností uhelného zrna na době setrvávání v prostředí reakčního plynu. Geometrie reaktoru v Sandia, průtok paliva, zrnitost i vlastnosti reakčního plynu byly srovnatelné s termokinetickými experimenty prováděnými na reaktoru v Ostravě. Monodisperzitu jimi použitého souboru zrn lze charakterizovat pomocí kvantitů: $d_{p0,1} = 53 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ a $d_{p0,9} = 66 \cdot 10^{-6} \text{ m}$, tj. 80 % hm. tvořila zrna o zrnitosti v intervalu $Z \in (53; 66) \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$. Porovnáním s rozsevou křivkou souboru zrn tuzemského uhlí na obr. 4 lze konstatovat, že jimi použitý soubor zrn se více blížil monodisperznímu. Výsledky experimentů lze shrnout do několika bodů:

- Zrno během vyhořívání napuchne do té míry, že se jeho charakteristický rozměr zvětší 1,8 až 2,5 krát.
- Čím příznivější podmínky pro oxidaci hořlaviny v reaktoru budou, tím rychleji se bude geometrický tvar měnit v kouli.
- V prostředí příznivém pro oxidaci hořlaviny dojde postupně k významnému přiblížení geometrického tvaru zrna kouli, že bude možné uvažovat $\varphi \sim 1$.

² Pro separaci jednotlivých frakcí bylo použito metody „mokrého síťování“, v anglickém originále „wet sieving“.

Napuchnutí zrna lze vysvětlit tím, že v uhelné substanci dochází k podobnému jevu jako během sušení paliva v sestupné sušce. Je-li uhelná substance podrobena prudkému ohřevu, dojde vlivem kapilárního toku způsobeného uvolňováním vlhkosti nebo prchavé složky hořlaviny k rozšíření pórů. Je-li překročena mez pevnosti uhelné substance, dojde k dezintegraci zrna na menší částice [10]. Je-li však deformace pružná, pak zrno tzv. „napuchne“, tak jak je publikováno v literatuře [12]. Nárůst objemu zrna je provázen významným poklesem hustoty uhelné substance, neboť během odplyňování hmoty zrna ubývá a současně roste objem.

Po odplynění prchavé složky hořlaviny začíná vyhořívání pyrolýzního zbytku. Během této fáze se objem zbylé části zrna smršťuje. Jev je doprovázen trvalým snižováním hmotnosti vlivem oxidace hořlaviny. V ideálním případě se geometrický tvar zrna po dosažení tvaru koule již nemění. Změna sféricity v čase bude zanedbána. Mimo jiné proto, že např. software Ansys Fluent 14, který by byl použit pro sestavení CFD modelu obtékání zrna reaktivním plynem, neumožňuje zadání v čase variabilní sféricity ani rozměru zrna.

2.6.3 Zpracování tuhých zbytků po spálení

Na konci reaktoru je odběrová sonda umožňující kontinuální odběr tuhých zbytků po spálení a jejich vychlazení. Požadavky na chladicí výkon jsou vysoké, neboť je třeba žhavým zrnům rychle odebrat teplo, aby došlo k zastavení oxidace hořlaviny (inertizaci). Předpokládá se, že klesne-li teplota zrna pod 150 °C, hoření již neprobíhá. Z těchto důvodů byl instalován kryogenní chladič, chladicí látkou je zkvalněný N₂ o bodu varu -195,8 °C. Zrna jsou po ochlazení zachycována na filtračním papíře. Po ukončení měření je odběrová sonda rozebrána, zrna jsou nasypána do žáruvzdorných misek a je stanoven obsah popela. Takto získaná hodnota tzv. mechanického nedopalu spolu s informací o době setrvání v reaktoru představuje 1 bod vyhořívací křivky.

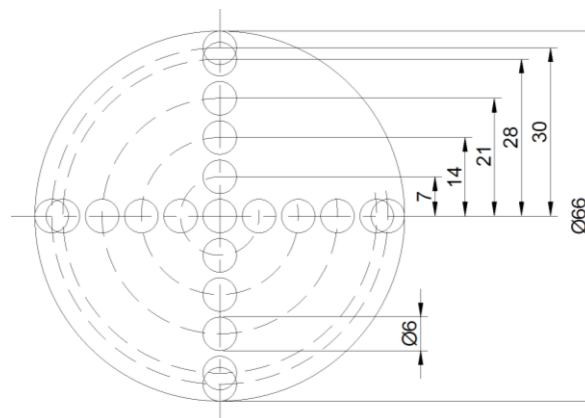
3. Experimentální část

3.1. Vyšetřování rychlostního profilu

V dubnu 2014 byly provedeny první experimenty, jejichž cílem bylo analyzovat vliv aplikace syntetizovaného proudění v reaktoru [13]. Předpokládalo se, že aplikací syntetizovaného proudění by mohla vzniknout vírová struktura, která by deformovala rychlostní profil v reaktoru. Proběhlo několik pokusů o snímání dynamického tlaku Prandtlou sondou o průměru 6 mm zapojenou do mikromanometru. Dynamický tlak byl snímán v síti celkem 21 bodů dle obrázku 10. Z Bernoulliho rovnice lze odvodit rovnici (10), kterou lze z naměřených dynamických tlaků určit rychlost proudící tekutiny.

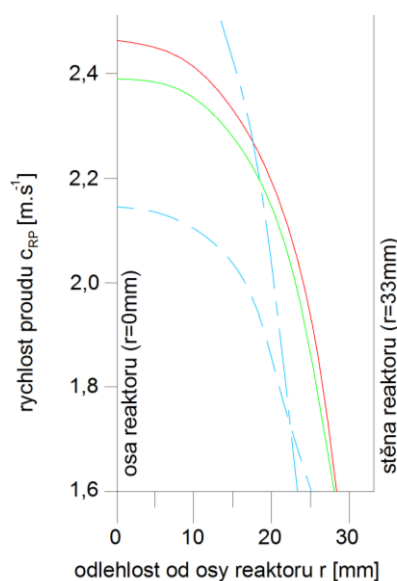
$$c_{RP} = k \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{p_D}{\rho_{SRP}}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (10)$$

V případě Prandtlou sondy lze uvažovat: $k = 1$. Měření proběhla za teploty 30 °C a poté i za 250 °C. Měřené hodnoty dynamického tlaku se pohybovaly v intervalu: $(1 \leq p_D \leq 3) Pa$.



Obr. 10 Síť měřících bodů po příčném průřezu reaktoru
Fig. 10 Measuring points on cross-section of reactor

Tvary rychlostních profilů byly získány opakovaně. Obrázek 11 demonstruje, že rozdíl mezi prouděním za standardních podmínek a syntetizovaným prouděním je nepatrný. V ose reaktoru dosahuje podíl rychlosti proudění za standardních podmínek vůči proudění syntetizovanému pouze ~1,05.



Obr. 11 Detail rychlostního profilu v reaktoru, $c_{O_2} = 21 \%$, $t_{RP} = 250 \text{ °C}$ (modrá čárkovaná linka – turbulentní profil definovaný mocninovým zákonem, modrá čerchovaná – laminární profil, červená – standardní proudění, zelená – aplikace syntetizovaného proudění)

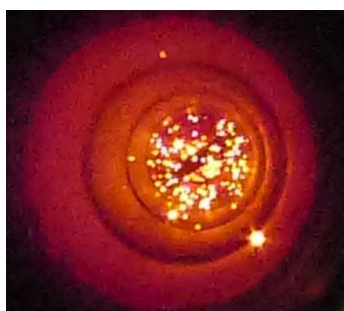
Fig. 11 Detailed view on influence of air velocity by distance of reactor axis, parameters of reacting gas: $c_{O_2} = 21 \%$, $t_{RP} = 250 \text{ °C}$ (the blue dashed line – turbulent flow, the blue centered line – laminar flow, the red line – standard flow, the green line – applied synthetic jet)

3.2. Vizuální analýza pohybu uhelných zrn

V květnu 2015 proběhlo několik experimentů, jejichž cílem bylo analyzovat reakci zrn uhelného prášku

na syntetizované proudění. Na základě pokusu s vonnou tyčinkou [3] byl zaveden předpoklad, že by uhelné zrno v syntetizovaném proudu mělo rychleji hořet. Rozdíl mezi vyhoříváním za standardních podmínek a vyhoříváním v syntetizovaném proudu by měl být rozpoznatelný již vizuálně na základě intenzivnějšího záření [3]. Za účelem ověření těchto předpokladů byly provedeny experimenty na intervalu teplot: ($500 \leq t_{RP} \leq 800$) °C.

Závislost záření uhlých zrn na aplikaci syntetizovaného proudění nebylo možno zcela jednoznačně vyhodnotit. Nicméně bylo potvrzeno, že se prostředí pádové trubky rozechvělo s měřitelnou amplitudou v řádu 10^0 mm. Ilustrační snímek pohledu do reaktoru je na obrázku 12.



Obr. 12 Pohled do reaktoru – ilustrační snímek
Fig. 12 View to drop tube furnace reactor – for demonstration purpose only

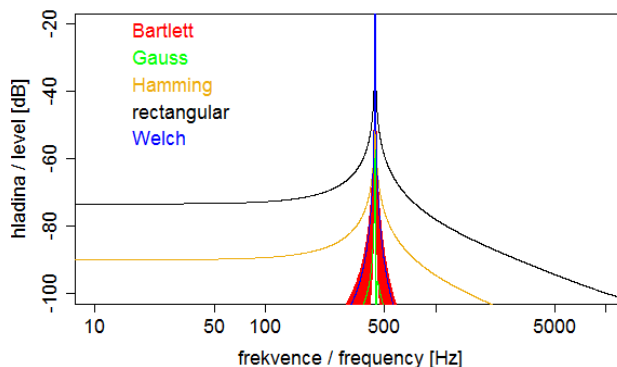
3.3. Snímání hluku v reaktoru

3.3.1 Měřicí aparatura

Během obou výše popsaných experimentů bylo jedno z aktuálně nevyužívaných dávkovacích hrdel osazeno jiným zvukovodem zakončeným mikrofonem, jímž byla snímána odezva v podobě záznamu hluku. Pro snímání byl použit sériově vyráběný mikrofon, který není výrobcem určen pro měřicí účely. Měřicí řetězec mikrofon – zesilovač byl podroben kalibraci kmitočtové charakteristiky v laboratoři (nahrávacím studiu) pracoviště FEL ČVUT. Výsledkem byla kalibrační křivka. Po korekci nasnímaných hodnot touto kalibrační křivkou, lze na intervalu kmitočtu: ($30 \leq f \leq 8 \cdot 10^3$) Hz považovat vzorek hluku zkeslený či tlumený o méně než 3 dB.

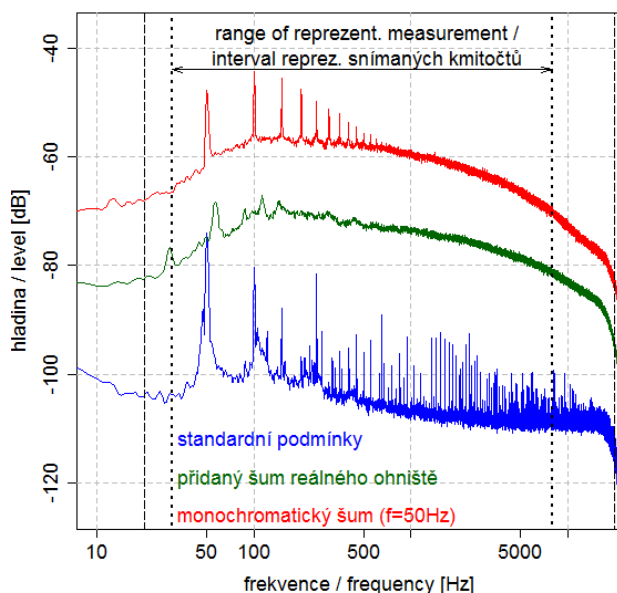
3.3.2 Metodika vyhodnocení

Předpokládaný hluk, který je třeba snímat má charakter šumu s malou četností tónů vyšší intenzity a jejich vyšší harmonické řady na intervalu kmitočtů ($30 \leq f \leq 10^3$) Hz. V souladu s doporučením pracovníků Katedry radioelektroniky FEL ČVUT a s ohledem na předpokládaný charakter, bylo pro účel tvorby vzorků dat použito Gaussova okna. Rozdíl v použití různých oken byl demonstrován na tónu o kmitočtu $f = 440$ Hz, viz obr. 13. Je zde patrné pozadí standardních experimentů (modrá křivka), dále jsou uvedeny spektrogramy 2 variant experimentů se syntetizovaným prouděním (červená a zelená křivka). Záznam šumu, jímž bylo proudění během těchto zkoušek syntetizováno, byl získán v ohništi kotle ETU II.



Obr. 13 Spektrogram odezvy na tón o kmitočtu $f = 440$ Hz v závislosti na typu zvoleného okna
Fig. 13 Spectrogram of simple tone $f = 440$ Hz in dependency on used window function

Spektrogram na obrázku 14 demonstruje hluk vzniklý provozem reaktoru.



Obr. 14 Porovnání spekter odezvy reaktoru
Fig. 14 The spectra comparison of noise during measurement

Byl nasnímán při výkonovém zatížení blízkém jmenovitému. Metodika snímání byla validována během termoakustických experimentů na kotlích EPRII a ETUII, popsána je v literatuře [14,15].

Zvukovod, na němž je osazen reproduktor, má délku včetně dávkovacího hrdla ~ 1 m a vnitřní průměr 20 mm. Lze tedy předpokládat, že v ústí zvukovodu do reaktoru se bude vlnění šířit formou rovinné vlny, nikoliv kulové. Fázový posun fáze akustického tlaku p_A vůči fáze akustické rychlosti c_A je nulový. Rozložení teplot v objemu reaktoru je rovnoměrné. Machovo číslo proudu reakčního plynu v reaktoru nabývá hodnot $Ma \ll 0,3$. Ačkoliv hodnota Reynoldsova čísla vyjadřující vztah proudu disperze vůči stěně reaktoru nabývá hodnot

$Re \sim 2000$, hodnota Reynoldsova čísla vyjadřující vzájemný vztah složek disperze nabývá hodnot Re v řádu 10^{-1} .

Jedná se sice o hraniční případ lineární akustiky, považmo platnosti obecné vlnové rovnice, nicméně působení hluku lze za výše zavedených předpokladů (typ vlny, Re , Ma) a dalších zjednodušení analyticky stanovit. Útlumy zvukovodu zdroje hluku (reproduktoru), reaktoru i zvukovodu snímače (mikrofonu) lze zanedbat. Z obrázku 14 je patrné, že hluk buzený membránou reproduktoru do reaktoru dospěl, čímž byly rozptýleny pochybnosti o významu impedance zvukovodu.

3.4. Termokinetické měření

V listopadu 2015 byla provedena měření, jejichž cílem bylo definovat rozdíl termokinetických vlastností během měření za standardních podmínek a za podmínek syntetizovaného proudění. Na základě pozorování trendu vyhořívání vonné tyčinky bylo očekáváno, že se aplikací syntetizovaného proudění zlepší podmínky pro přestup tepla a hmoty, viz [3]. Podmínky provedených experimentálních měření lze z pohledu hluku emitovaného do reaktoru shrnout následovně:

- standardní podmínky – bez hluku,
- syntetizované proudění – šum reálného ohniště,
- syntetizované proudění – tón 50 Hz (u většiny vzorků),
- syntetizované proudění – tón 100 Hz (jen pro některé vzorky).

Uvedená měření byla postupně provedena pro 4 kombinace podmínek uvedených v tabulce 4. Součin variant z pohledu emitovaného hluku a parametrů uvedených v tabulce 4 dává celkový počet 16 vyhořívacích křivek. Tvar každé z křivek byl zjišťován orientačně ve 3 strategicky zvolených bodech, viz obrázek 15.

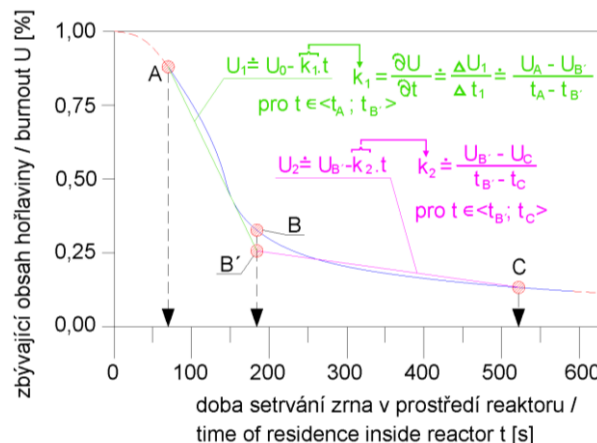
Tab. 4 Kombinace podmínek experimentů

Tab. 4 Combination of parameters during measurement

| Teplota / Temperature t_{RP} [°C] | Koncentrace O_2 / O_2 concentration c_{O_2} [%] | Zrnitost / Par- ticle size Z [μm] |
|---|--|--|
| 700 | 8 | (56; 80) |
| 1000 | 4 | (56; 80) |
| 700 | 8 | (200; 315) |
| 1000 | 4 | (200; 315) |

První bod křivky – dle obrázku 15 bod „A“ se nachází v oblasti zplyňování prchavé složky hořlaviny. Vzhledem k vysokému trendu zplyňování bývá zejména u malých zrn doba setrvání pro získání bodu „A“ rovna nejkratší možné době setrvání. Křivku vyhořívání lze pomyslně rozdělit na dvě části: prudké odplynění prchavé složky a pozvolné vyhořívání pyrolýzního zbytku.

Obě partie křivky lze nahradit dvěma úsečkami, viz $U_1 = fce(t)$ – zelená linka a $U_2 = fce(t)$ – fialová linka (viz obrázek 15).



Obr. 15 Ilustrační příklad vyhořívací křivky uhlého prášku

Fig. 15 Example of time dependency pulverized coal burnout

Velice blízko bodu průniku úseček „B“ se nachází bod „B“, který leží na reálné vyhořívací křivce. Bod „B“ je tedy v místě největší nespojitosti gradientu vyhořívání, tj. $\max\left(\frac{\partial^2 U}{\partial t^2}\right)$. Bod „C“ byl zvolen tak, aby reprezentoval fázi vyhořívání pyrolýzního uhlíkatého zbytku. Obdobný postup byl v minulosti volen i v rámci jiných experimentů na reaktorech ve Vratislavi, Budapešti či Drážďanech [16].

Navzdory očekávání, zvýšení rychlosti vyhořívání během aplikace syntetizovaného proudění v jakékoliv z tří výše uvedených forem se nepotvrdil. Vyhořívací křivky všech 4 variant z pohledu aplikace syntetizovaného proudění se téměř překrývají [17].

4. Diskuze výsledků

Následující kapitola je zaměřena na popis pohybu zrn v proudě reakčního plynu. Neboť právě zde se skýtá možné vysvětlení výsledků experimentů. Nejprve je pozornost věnována experimentu za standardních podmínek. V další podkapitole je řešen pohyb zrna v syntetizovaném proudě. Pro účel následujících výpočtů byly uvažovány podmínky a parametry v úvodu tohoto příspěvku. Dále byly zavedeny následující zjednodušující předpoklady:

- Dávkování prášku lze považovat za kontinuální, tj. $m_{PAL} = konst.$
- Geometrický tvar reálného zrna je nahrazen koulí o průměru d_p . Velikost zrna se v průběhu vyhořívání nemění.
- Zrna uhlého prachu nemají tendenci k dezintegraci ani ke shlukování do aglomerací.
- Sféricita zrn uhlého prachu ϕ se po celou dobu setrvání v reaktoru nemění.
- Zrna uhlého prachu jsou unášena reakčním plynem, současně na ně působí gravitační zrychlení.
- Pohyb zrna v proudě tekutiny je přímočarý ve směru kladného potenciálu gravitačního zrychlení Země.

Pohyb zrna reaktorem v příčném směru lze zanedbat, tudíž vektor vnějšího silového pole bude: $K = (K_X, K_Y, K_Z) = (0, g, 0)$.

- Střední rychlost proudu reakčního plynu po příčném průřezu reaktoru byla zvolena $c_{RP} = 3 \text{ m.s}^{-1}$.
- Koncentrace O_2 v reakčním plynu je $c_{O_2} = 8 \%$ a její změnu v čase lze zanedbat.

4.1. Obtékání zrna reakčním plynem za podmínek standardně prováděného experimentu

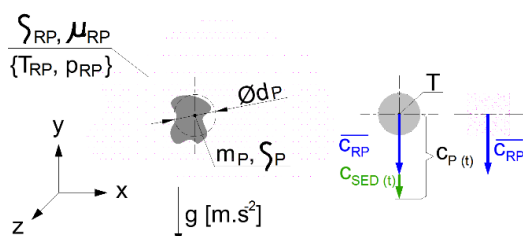
Doba setrvání uhelného zrna v reaktoru je v nejjednodušším případě dána obecným vztahem:

$$t_p = \frac{s_p}{c_p(t)} \quad [s] \quad (11)$$

Absolutní rychlost zrna $c_p(t)$ je dána součtem rychlosti reakčního plynu $\overline{c_{RP}}$ a sedimentační rychlosti zrna c_{SED} :

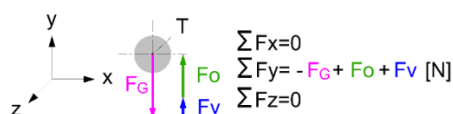
$$c_p(t) = \overline{c_{RP}} + c_{SED}(t) \quad [m.s^{-1}] \quad (12)$$

Grafická reprezentace rovnice (12) je na obrázku 16.



Obr. 16 Skladba rychlostí složek disperze
Fig. 16 Dispersion species velocities

Tvar uhelného zrna je pro účel dalšího výpočtu aproximován koulí korigovanou tvarovým součinitelem φ . Na zrno unášené proudem tekutiny působí síly: tíhová F_G , setrvačné hmoty F_V a odporu prostředí vůči pohybu F_O . Zatímco první zmíněná působí směrem dolů, zbylé dvě působí vzhůru, viz obrázek 17.



Obr. 17 Rovnost sil působících na zrno
Fig. 17 Balance of forces acting to lignite particle

Z rovnosti sil na zrno, lze odvodit³ rovnici sedimentační rychlosti zrna:

$$c_{SED}(t) = \sqrt{\frac{4 \cdot d_p \cdot \varphi \cdot (c_p - c_{RP}) \cdot g}{3 \cdot R_y \cdot c_{RP}}} \quad [m.s^{-1}] \quad (13)$$

Až na součinitel odporu R_y jsou hodnoty všech proměnných známé konstanty. Součinitel odporu tělesa vůči

proudu tekutiny R_y je obecně závislý na hodnotě Reynoldsova kritéria Re :

$$Re = \frac{(c_p - c_{RP}) \cdot d_p}{\nu_{RP}} = \frac{c_{SED} \cdot d_p}{\nu_{RP}} \quad [-] \quad (14)$$

V rovnici (14) jsou však 2 neznámé parametry. Na základě zkušeností lze soudit, že rozdíl rychlostí v čitateli rovnice (14) bude v řádu 10^{-1} m.s^{-1} . Lze jej kvalifikovaně odhadnout na $0,2 \text{ m.s}^{-1}$. Pak pro zrno velikosti $d_p = 90 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ je $Re \sim 0,1$.

Závislost $R_y = f(Re)$ těles je publikována v literatuře [18; 19; 20]. Na základě Re je v souladu s literaturou [18] zvolen vztah pro výpočet R_y podle Stokesese:

$$R_y = \frac{24}{Re} \quad [-] \quad (15)$$

Dosazením vztahu (15) do rovnice (13) a následným dosazením známých konstant byla získána velikost relativní rychlosti zrna vůči reakčnímu plynu $c_{SED}(t) = 0,1 \text{ m.s}^{-1}$.

4.2. Obtékání zrna reakčním plynem syntetizovaným proudem

4.2.1 Pohyb reakčního plynu

Reaktor je na jednom konci otevřený do prostoru a na druhém konci je těleso ohříváku, usměrňovací mříž a další prvky představující překážku. Nejvíce se budou projevovat fluktuace disperze o vlastním kmitočtu kavity reaktoru f_K a jeho vyšší harmonické. Základní kmitočet f_K lze za přijetí předpokladu, že reaktor je na jednom konci otevřený, vyčíslit rovnicí (16)⁴. I relativně nízká hladina intenzity na tomto kmitočtu bude mít potenciál významného projevu.

$$f_K = \frac{c_z}{4 \cdot L} = \frac{\sqrt{\kappa_{RP} \cdot r_{RP} \cdot T_{RP}}}{4 \cdot L} \quad [Hz] \quad (16)$$

Dosazením do rovnice (16) byly získány závislosti vlastních kmitočtů kavity reaktoru na parametrech reakčního plynu. Obrázek 18 demonstruje, že hodnota vlastního kmitočtu kavity reaktoru je silně ovlivněna teplotou a méně koncentrací O_2 .

Předpokládá se, že molekuly reakčního plynu budou sledovat vlny o základním kmitočtu f_K a jeho vyšších harmonických šířících se prostředím reaktoru s okamžitou výchylkou ve směru osy y dle rovnice (17). Derivací fázoru $\widetilde{y_{RP}}(t)$ podle času se získá okamžitá hodnota harmonické složky rychlosti pohybu molekul reakčního plynu, viz rovnice (18).

Výsledná rychlost pohybu reakčního plynu je dána rovnicí (19).

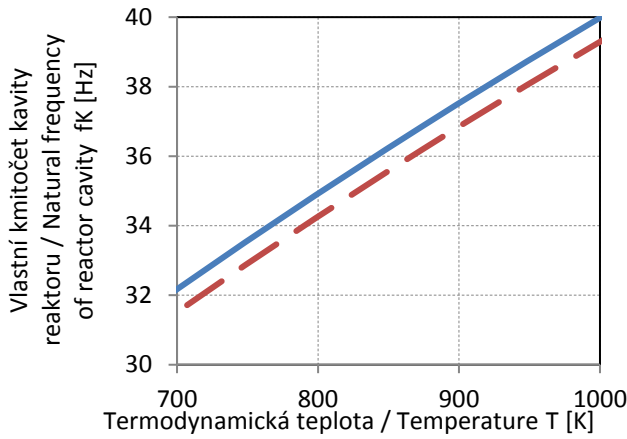
$$\widetilde{y_{RP}}(t) = y_o \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \Delta\vartheta) \quad [m] \quad (17)$$

$$\widetilde{c_{RP}}(t) = \frac{d\widetilde{y_{RP}}(t)}{dt} \quad [m.s^{-1}] \quad (18)$$

$$c_{RP}(t) = \overline{c_{RP}} + \widetilde{c_{RP}}(t) \quad [m.s^{-1}] \quad (19)$$

³ Odvození rovnice (13) je provedeno v literatuře [10].

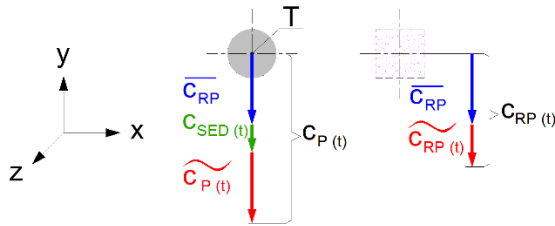
⁴ Pro obě složky reakčního plynu byly odečteny hodnoty κ_i a r_i z literatury [21]. Podle c_{O_2} byly spočteny podíly složek, v závislosti na nich byly stanoveny hodnoty κ_{RP} , r_{RP} .



Obr. 18 Závislost hodnoty vlastního kmitočtu na parametrech reakčního plynu (červená přerušovaná křivka – $c_{O_2} = 4\%$, modrá plná křivka – $c_{O_2} = 8\%$)
Fig. 18 Dependency of resonant frequency by temperature and O_2 concentration (red dashed curve – $c_{O_2} = 4\%$, blue continuous curve – $c_{O_2} = 8\%$)

4.2.2 Pohyb zrn uhelného prášku

Vyobrazení složek rychlostí reakčního plynu i zrna za působení syntetizovaného proudění je na obrázku 19.



Obr. 19 Skladba rychlostí složek disperze
Fig. 19 Dispersion species velocities

Pohyb zrna bude v porovnání se standardními podmínkami obohacen o harmonickou rychlost vyvolanou působením hluku:

$$\widetilde{c_P(t)} = \widetilde{c_P(t-1)} + \Delta\widetilde{c_P(t)} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (20)$$

Předpokládá se, že složka rychlosti působícího mechanického vlnění v čase $t = 0$ s, tj. v okamžiku, kdy uvažované zrno opouští ústí dávkovací sondy je rovna $\widetilde{c_P(t=0)} = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Přírůstek $\Delta\widetilde{c_P(t)}$ je úměrný silovému působení fluktuujícího reakčního plynu, jímž je zrno obtékáno:

$$\Delta\widetilde{c_P(t)} = \widetilde{a_P(t)} \cdot \Delta t = \frac{F_{O(t)}}{m_P} \cdot \Delta t \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (21)$$

Výsledná rychlost pohybu zrna je v souladu s obrázkem 19 dána rovnicí (22). Pohyb zrna ve směru osy y lze popsat výchylkou $y_P(t)$, kterou lze kvantifikovat rovnicí (23). Přírůstek výchylky $\Delta y_P(t)$ je dán rovnicí (24).

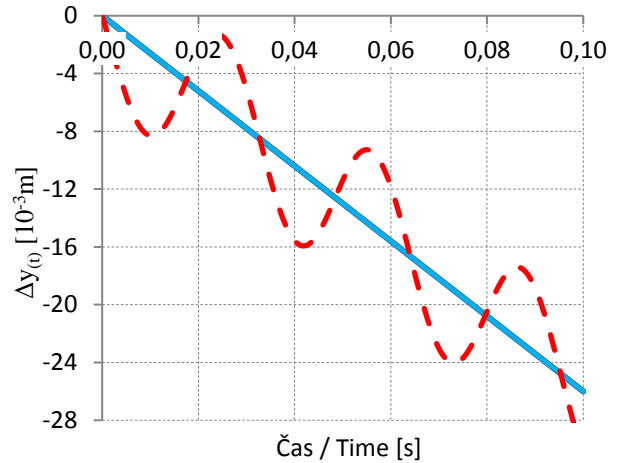
$$c_P(t) = \overline{c_{RP}} + c_{SED}(t) + \widetilde{c_P(t)} \quad (22)$$

$$y_P(t) = y_P(t-1) + \Delta y_P(t) \quad [m] \quad (23)$$

$$\Delta y_P(t) = w_P(t) \cdot \Delta t \quad [m] \quad (24)$$

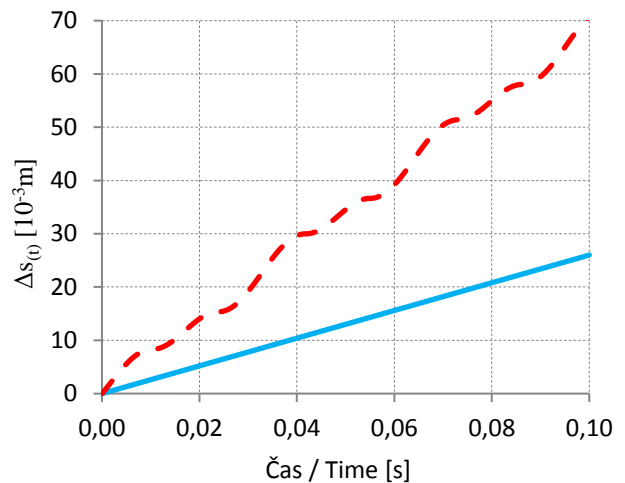
4.2.3 Vzájemný pohyb zrna vůči reakčnímu plynu

Vliv syntetizovaného proudění na relativní pohyb zrna vůči reakčnímu plynu bude demonstrován na hluku o parametrech: $f = 32 \text{ Hz}$, $y_0 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, rozměr zrna shodně s předchozí kapitolou $d_p = 90 \cdot 10^{-6} \text{ m}$. Relativní pohyb zrna vůči elementárnímu objemu reakčního plynu lze popsat rozdílem výchylek. Závislost rozdílu výchylek v čase je na obrázku 20.



Obr. 20 Závislost výchylek v čase (modrá plná křivka – standardní podmínky experimentu, červená přerušovaná křivka – syntetizované proudění o parametrech $f = 32 \text{ Hz}$, $y_0 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$)

Fig. 20 Time dependency of deflection of reacting gas flow and falling lignite particle motion (blue continuous curve – standard experiment, red dashed curve – experiment with synthetic jet about frequency $f = 32 \text{ Hz}$ and dispersion amplitude $y_0 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$)

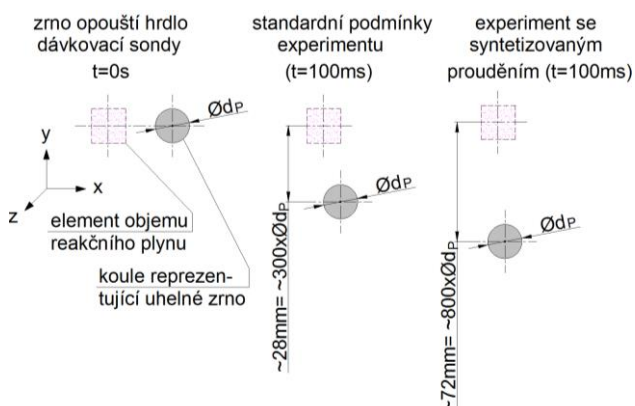


Obr. 21 Závislost dráhy relativního pohybu v čase (modrá plná křivka – standardní podmínky experimentu, červená přerušovaná křivka – syntetizované proudění o parametrech $f = 32 \text{ Hz}$, $y_0 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$)

Fig. 21 Time dependency of trajectory length of reacting gas flow and falling lignite particle motion (blue continuous curve – standard experiment, red dashed curve – experiment with synthetic jet about frequency $f = 32 \text{ Hz}$ and dispersion amplitude $y_0 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$)

4.3. Důsledky obtékání zrna reakčním plynem

V okamžiku $t = 0$ s sledované zrno uhlénoho prášku velikosti $d_p = 90 \cdot 10^{-6} m$ opouští ústí dávkovací sondy. V jeho bezprostředním okolí se nachází element objemu reakčního plynu. Ale vlivem toho, že se zrno pohybuje rychleji než reakční plyn, bude za standardních podmínek v čase $t = 0,1$ s vzdálenost sledovaného elementu objemu od sledovaného zrna $\Delta S_{(t=0,1s)} \cong 27 \cdot 10^{-3} m$, což je ~ 300 násobek průměru koule reprezentující zrno. Situaci graficky demonstruje obrázek 22.

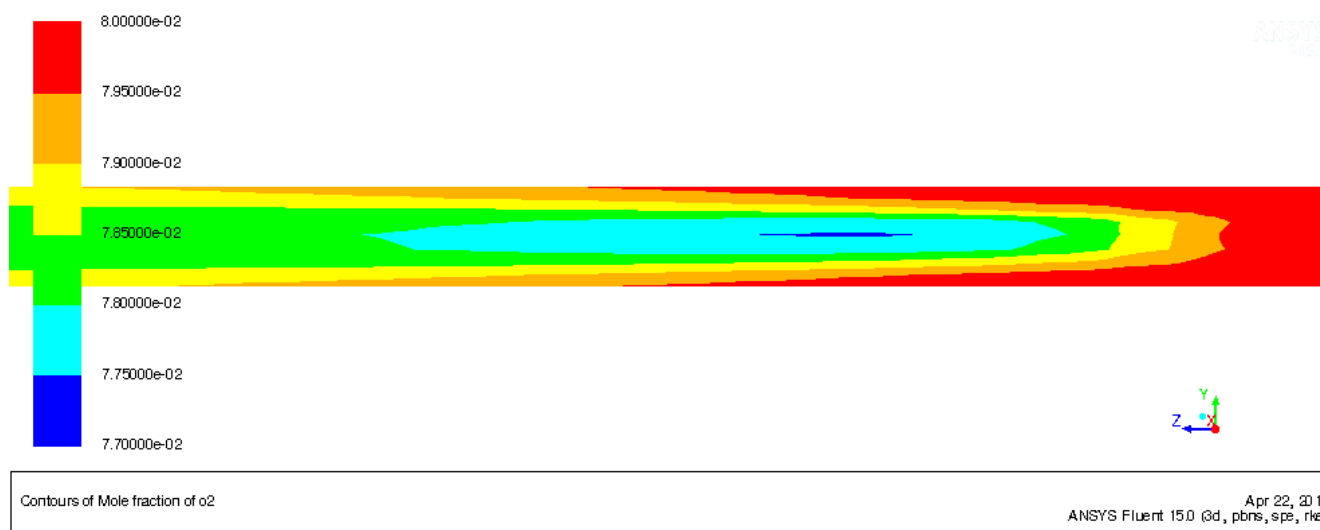


Obr. 22 Důsledky relativního pohybu složek disperze
Fig. 22 Effect of dispersion species relative motion

Během experimentu se syntetizovaným prouděním nabývá relativní pohyb v čase $t = 0,1$ s rozdílu $\Delta S_{(t=0,1ms)} \cong 72 \cdot 10^{-3} m$, což přibližně odpovídá 800 násobku průměru koule reprezentující zrno.

Oxidace hořlaviny probíhá především na povrchu zrna. K transportu molekul O_2 z reakčního plynu na povrch zrna uhlénoho prášku dochází formou difúzního toku. Teplotní pole v reaktoru je dost vyrovnané po příčném průřezu i po celé jeho délce. Lze předpokládat, že hlavní roli bude mít gradient koncentrace O_2 . Pole koncentrace po příčném průřezu vykazuje předvídatelnou nehomogenitu. Statisticky bude koncentrace O_2 v ose reaktoru nižší, neboť trajektorie zrn vede nejčastěji v blízkosti osy reaktoru. Příčinou difúzního toku se koncentrace O_2 v ose po určité době vyrovná s koncentrací v blízkosti stěny.

Na obrázku 23 je ilustrační příklad rozložení kontur koncentrace O_2 . Jedná se o detailní záběr podélného průřezu reaktoru. Detail zabírá oblast, v níž je dávkováno palivo. Disperze proudí zprava doleva, neboť pravý konec je ve skutečnosti nahoře a levý konec dole (viz souřadný systém v pravém dolním rohu). Jak vidno, nejtmaší modrá oblast představuje oblast, v níž je molový zlomek $X_{O_2} \leq 7,7\%$. Zobrazený úsek reaktoru má 0,8 m, lze tedy odhadovat, že nejtmaší oblast má délku cca 0,1 m. Zvýšení $\frac{\partial X_{O_2}}{\partial z}$ aplikací syntetizovaného proudění se zvyšuje pravděpodobnost, že zrno opouští ekvipotenciální oblast s nižší koncentrací O_2 , což ve svém důsledku představuje potenciál zvýšení trendu vyhořívání hořlaviny. Nicméně na základě tvaru ekvipotenciálních oblastí X_{O_2} lze soudit, že by bylo zapotřebí velké amplitudy relativního pohybu, aby se zrno dostalo do oblasti s vyšší koncentrací O_2 . V souladu s výše uvedeným se lze domnívat, že i za standardních podmínek (bez aplikace syntetizovaného proudění) se kontinuálně obměňuje reakční plyn v bezprostředním okolí zrna.



Obr. 23 Ilustrační obrázek rozložení koncentrace O_2 – detail vstupu paliva do reaktoru (svislá osa reaktoru má na obrázku vodorovnou polohu)

Fig. 23 Example of contours of O_2 mole fractions in reactor (the most dark blue part represents part where volatile compound oxidized)

5. Závěr

Metodika přípravy vzorků uhlénohliníkového prášku ze surového paliva používaná laboratoří Výzkumného energetického centra při VŠB-TUO a jí dosažené parametry jsou srovnatelné s jinými laboratořemi.

Za účelem stanovení hodnoty sféricity zrn hnědouhlénohliníkového prášku proběhlo kontrolní porovnání s výsledky dosaženými v laboratoři v Sandia. Experimentem bylo prokázáno, že se tvar zrn vzorku tuzemského uhlí z lomu Libouš příliš neliší. Pro účel nastavení parametrů CFD modelu je možné uvažovat, že zrna uhlénohliníkového prášku z lomu Libouš mají sféricitu $\varphi = 0,8$.

Během odplyňování uhlénohliníkové zrna napuchne, čímž vzroste jeho charakteristický rozměr přibližně na dvojnásobek. Během vyhořívání pyrolyzního zbytku dojde ke zmenšení přibližně na původní velikost.

Dále bylo demonstrováno, že uvažované chemické složení reakčního plynu je srovnatelné s podmínkami reálného ohniště spalujícího hnědouhlénohliníkového prášku. Avšak chemické složení reakčního plynu používaného v ostravském reaktoru je odlišné vůči plynu používanému v některých jiných laboratořích. Proto je třeba brát tyto rozdíly na zřetel během případného porovnávání vyhořívacích křivek s křivkami získanými v těchto laboratořích.

Bylo demonstrováno, jakou měrou se vlivem dávkování uhlénohliníkového prášku změnila koncentrace O_2 v reakčním plynu. Za podmínek výše uvedených bude úbytek koncentrace O_2 vždy menší než 0,09 %.

Na základě měření dynamického tlaku nebylo možno reprezentativně stanovit změnu rychlostního profilu vlivem syntetizovaného proudění hlukem. Přítomnost mechanického vlnění (hluku) v reaktoru byla potvrzena snímáním pomocí mikrofónu, jakož i z videozáznamu staniolové folie kmitající v syntetizovaném proudě reakčního plynu. Byl identifikován i vliv intenzity hluku. Pokusy identifikovat rozdíly ve vyhořívání během syntetizovaného proudění pouze vizuálním způsobem se ukázaly nevyhodnotitelné. V další fázi experimentů bylo provedeno celkem 16 variant jednoduchých vyhořívacích křivek. Vyhořívací křivky zkoušek s aplikací syntetizovaného proudění se nelišily od standardně získávaných.

V další části příspěvku byl kvantifikován relativní pohyb složek disperze během experimentů za standardních podmínek a za syntetizovaného proudění. Velikost relativního pohybu byla podrobena diskuzi. Vysvětlení shodného tvaru vyhořívacích křivek bylo nalezeno v porovnání relativního pohybu složek disperze a konfrontace s polem koncentrací c_{O_2} (resp. molových zlomků) X_{O_2} . Teplotní pole i pole koncentrace c_{O_2} je relativně dost vyrovnané. Proto zvýšení relativního pohybu výše definovanou měrou již další zvýšení trendu vyhořívání hořlaviny nepřináší.

Syntetizované proudění během experimentálních měření termokinetických vlastností uhlénohliníkového prášku bylo aplikováno ve snaze více přiblížit podmínky experimentálního měření podmínkám reálného ohniště. Další pokusy v tomto směru by mohly spočívat ve dvoustupňovém, případně třístupňovém přívodu okysličovadla. Neboť v reálném ohništi vybaveném moderní sadou práškových hořáků⁶ je v oblasti hořákového pásma redukční atmosféra (při koeficientu přebytku vzduchu menším než 1,00) a oxidační atmosféra je v oblasti terciálního resp. dohořívacího vzduchu (při koeficientu přebytku vzduchu větším než 1,00).

Seznam použitých veličin

List of used symbols of variables:

| | |
|---|--|
| A [%] | ... obsah popela v palivu / ash content |
| $B; d; E$ [m] | ... délkové rozměry / geometric dimensions |
| c [%] | ... objemová koncentrace / volumetric concentration |
| c [m·s ⁻¹] | ... rychlost pohybu / velocity |
| C [%] | ... koncentrace uhlíku v palivu / carbon content |
| f [Hz] | ... kmitočet / frequency |
| F [N] | ... síla / force |
| g [m·s ⁻²] | ... gravitační zrychlení / gravity acceleration |
| H [%] | ... koncentrace vodíku v palivu / hydrogen content |
| k [-] | ... součinitel sondy / probe coefficient |
| K [m·s ⁻²] | ... vnější silové pole / vector of external forces |
| L [m] | ... délka reaktoru / length of reactor |
| \dot{m} [kg·s ⁻¹] | ... hmotnostní průtok / mass flow |
| Ma [-] | ... Machovo porovnávací kritérium / Mach criterion |
| N [%] | ... koncentrace dusíku v palivu / nitrogen content |
| O [%] | ... koncentrace kyslíku v palivu / oxygen content |
| p [Pa] | ... tlak / pressure |
| r [m] | ... odlehlost od osy rotace / excentricity |
| R [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹] | ... měrná plynová konstanta / specific gas constant |
| Re [-] | ... Reynoldsovo porovnávací kritérium / Reynolds criterion |
| R [-] | ... součinitel odporu vůči obtékání / defiance coefficient |
| R [kg·kg ⁻¹] | ... poměrné množství zrn / cumulative ratio |
| s [m] | ... dráha, délka trajektorie / trajectory length |
| S [m ²] | ... plocha / area |
| S [%] | ... koncentrace síry v palivu / sulphur content |
| t [°C] | ... teplota / temperature |
| t [s] | ... čas / time |
| U [kg·kg ⁻¹] | ... stupeň vyhoření / burnout |
| \dot{V} [Nm ³ ·h ⁻¹] | ... objemový průtok / volume flow |
| V [%] | ... podíl prchavé hořlaviny / volatile compound |
| V [m ³] | ... objem / volume |

⁶ Dobrým příkladem jsou ohniště komplexně obnovených elektrárenských parních kotlů instalovaných na Elektrárnách Tušimice II a Elektrárnách Pruněv II.

w [$m \cdot s^{-1}$] ... rychlost proudu tekutiny / velocity of fluid
 W [%] ... obsah vody v palivu / water content
 X [%] ... molový zlomek / mole fraction
 Z [$10^{-6}m$] ... zrnitost / granulometry
 $\Delta\vartheta$ [rad] ... počáteční fáze / initial phase
 ϑ [rad] ... úhlová dráha / angular displacement
 κ [-] ... Poissonova konstanta / Poisson constant
 μ [-] ... součinitel přebytku vzduchu / air-fuel equivalence ratio
 ς [$kg \cdot m^{-3}$] ... měrná hmotnost látky / density
 φ [$m^2 \cdot m^{-2}$] ... tvarový součinitel / sphericity

Seznam dolních indexů / List of symbols of nether indexes:

DAF ... hořlavina / dry, ash free
 i ... dílčí / partial
 min ... minimální / minimal
 N ... normální podmínky / normal thermodynamical conditions
 PAL ... palivo / fuel
 PT ... pádová trubka / drop tube furnace
 R ... reálné zrno / real grain
 RP ... reakční plyn / reacting gas
 S ... koule / sphere
 $STECH$... stechiometrický / stoichiometric
 VZD ... vzduch / air
 x ... vztahující se ke konkrétní velikosti zrna / dependent on grain size

Seznam horních indexů / List of symbols of upper indexes:

1... odplyňování prchavé složky hořlaviny / degassing
 2... vyhořívání pyrolyzního zbytku / burning of pyrolysis residual
 A ... akustický / acoustic
 A, B, C ... body vyhořívací křivky (viz obrázek 6) / points of curve (see Fig. 6)
 D ... dynamický / dynamic
 D ... bezvodý / dry
 DAF ... hořlavina / dry ash free
 $\acute{}$... analytický vzorek po separaci čistě popelnatých zrn / analytical sample after ash grain separation
 G ... tíhová / weight
 K ... kavita reaktoru / reactor cavity
 o ... amplituda / amplitude
 O ... odpor vůči obtékání/ drag resistance
 P ... zrno / particle
 R ... surový / raw
 SED ... sedimentace / sedimentation
 V ... setrvačné hmoty / inertial mass
 x, y, z ... souřadnice kartézského systému souřadnic / axis of cartesian coordinate system
 ZV ... zvuk / sound

Ostatní značení / Another marks:

$X_{(t)}$... hodnota veličiny X v čase t / value of variable X at the moment t

\bar{X} ... hodnota veličiny X v ustáleném stavu, aritmetický průměr / value of variable X at steady state, arithmetic mean

\tilde{X} ... hodnota harmonické složky veličiny X / value of harmonic compound of variable X

Seznam zkratk / List of abbreviations:

VEC ... Výzkumné energetické centrum
 VŠB-TUO ... Vysoká škola báňská – Technická univerzita v Ostravě
 CFD ... computed fluid dynamics
 FEL ČVUT ... Fakulta elektrotechnická při Českém vysokém učení technickém v Praze
 EPRII ... Elektrárny Pruněřov II
 ETUII ... Elektrárny Tušimice II

Literatura

- VÍT, T.; DANDOVÁ, P.; TRÁVNÍČEK, Z.: Syntetizovaný proud, [vid. 01. 05. 2016]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/syntetizovany-proud-synthetic-jet.html>
- KORDÍK, J.: Theoretical and experimental analysis of synthetic jet actuators, Disertační práce, Fakulta Strojní ČVUT, 2011, Praha.
- ŠTĚPÁNEK, P.: Simulace podmínek reálného ohniště v pádové trubce. Kotle a energetická zařízení 2015, Brno 2015, ISSN 1804-6673.
- Základní popis funkce pádové trubky instalované na Energy & Environmental Research Center v Grand Forks v USA při Univerzitě v Severní Dakotě. Dostupné online dne 19. 3. 2016: <http://www.un-deerc.org/Equipment/Combustion-Systems/Drop-Tube-Furnaces.aspx>
- Popis pádové trubky instalované na Výzkumném energetickém centru v Ostravě v ČR při VŠB-TUO. Dostupné online dne 19. 3. 2016: <http://vec.vsb.cz/cz/zkusebna/padova-trubka-termokineticke-parametry-uhli.html>
- HOPAN, F.: Výzkumná zpráva č. 53/2012, Experimentální stanovování vyhořívacích křivek uhlí z ETU o granulometrii 56 až 80 μm v pádové trubce. Výzkumné energetické centrum při VŠB-TUO.
- TEYSSLER, J.: Spalování popelnatých hnědých uhlí. SNTL/Alfa, Praha, 1988.
- ŠEŠULKA, V.: Analýza paliv, SNTL/ALFA, 1970, Praha.
- MATHEWS, J. P.; ESER, S.; HATCHER, P. G.; SCARONI, A. W.: The shape of pulverized bituminous vitrinite coal particles, [KONA Powder and Particle](#), Year: 2007, Vol.: 25, pages: 145-152.
- ČERNÝ, V.: Mletí a sušení uhlí. Skriptum FS ČVUT, 1976, Praha.
- MĚCHURA, V.: Určení reaktivity hoření uhelného prášku, výzkumná zpráva č.: 26091320/1, 1987, EGÚ Praha.

12. MATHEWS, J. P.; HATCHER, P. G.; ESER, S.; SCARONI, A. W.: Time-temperature histories of bituminous coal particles in a drop-tube reactor, Prepr. Am. Chem. Soc., Div Fuel Chem., 1998, Boston, MA, August 22-27, 1998, 43, 3, 611.
13. ŠTĚPÁNEK, P.; NOREK, M.; HOPAN, F.: Vyhodnocení pokusu o termoakustický experiment v pádové trubce VEC, Technická zpráva MORE, s.r.o., 2014.
14. ŠTĚPÁNEK, P.: Snímání fluktuace tlaku v ohništi kotle spalujícího uhelný prášek. Paliva, ročník 2016, vol. 1, VŠCHT, Praha, ISSN 1804 – 2058, str. 1 - 6.
15. ŠTĚPÁNEK, P.: Termoakustická měření v sání mlýnů, Technická zpráva MORE, s.r.o., 2016.
16. ŠTOSEK, V: Zpráva ze studijního pobytu v Jen Warszawa-Pruszków, Cestovní zpráva, EGÚ, 1979, Praha.
17. HOPAN, F.: Zpráva č. 17/16 – Simulace reálných podmínek ohniště velkoprostorového parního kotle v pádové trubce, VEC při VŠB-TUO, 2016, Ostrava.
18. JANALÍK, R.: Obtékání a odpor těles. Skriptum VŠB-TUO, 2008, Ostrava.
19. HAIDER, A., LEVENSPIEL, O.: Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical Particles, Powder Technology, Vol. 58, pp. 63-70, (1989).
20. GABITTO, J., TSOURIS, C.: Drag Coefficient and settling velocity for particles of cylindrical shape, Powder Technology, Year: 2007, Vol. 183, pp. 314-322.
21. RAŽNJEVIČ, K.: Termodynamické tabulky, ALFA, 1984, Bratislava.

Summary

Petr ŠTĚPÁNEK^{1,2}, František HRDLIČKA², Vladimír MĚCHURA¹

*1 MORE, s.r.o. Podnikatelská 267, Praha 9
2 Fakulta strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6,
e-mail: petr.stepanek@fs.cvut.cz*

Thermo-acoustic experiments on drop tube flow

The mathematical formulation of time dependency of pulverized coal burnout is one of many CFD model parameters. The drop tube furnace is device used to obtain the time dependency of pulverized coal burnout. In order to solve the CFD model of pulverized coal combustion, it's necessary to get knowledge of initial and boundary conditions of experimental measurement. These conditions can vary and one must know which variation can be neglected. This paper focus on the variation of conditions and it's trying to calculate them. The sample of

solid fuel is lignite of mine Libouš in north-western Bohemia.

There were demonstrated how to obtain the suite of lignite particles approaching to monodisperse. It's obtained by air washing and separation of much finer particles.

There were presented simple experiment on particle dimensional analysis (see Fig.6 and 7) and calculation of particle sphericity ($\varphi = 0,8$). Results of experiment were compared with Appalachian hard coal particles ($\varphi = 0,78$, for details see [9]).

In the end there is little discussion around combustion influence to changes of concentration O_2 during thermokinetic measurements. The greatest decrement of O_2 during thermokinetic measurement by $1200^\circ C$ and atmospheric pressure is 0,09% vol.

Method of thermokinetic measurements organized in Ostrava is comparable with methods of other laboratories. However there are differences in details, so before comparison the burnout characteristics must be calculated influence of these differences. For example in Ostrava is used mixture of air and CO_2 actually, but in another laboratory is used mixture of air and N_2 .

In paper [3] was found statement: increment of relative motion causes increment of fuel oxidation rate. There were also discussed similarity of conditions real boiler furnace and conditions of experimental apparatus (drop tube furnace). During last two years there were done many experiments with synthetic jet which were focused on:

- Identification of flow character changes,
- Visual inspection of coal particle motion,
- Thermo-acoustic measurement,
- Thermo-kinetic measurement.

There weren't identified difference: of flow character, visual inspection of coal particle motion, thermo-kinetic measurement during measurement with or without noise. Nevertheless thermo-acoustic measurement verify noise intensity inside reactor of drop tube furnace.

Explanation of these results were found in simple mathematical model of relative motion between elementary volume of reacting gas and small coal particle and shape of O_2 concentration contours.

Experiments with synthetic jet on drop tube furnace reactor were absolved in order to approach the experiment conditions to conditions inside furnace of real steam boiler. Next potential step in approaching experiment conditions with conditions inside real furnace of modern steam boiler could lead to the application of air supplying in 2 levels (in 2 other levels of height).