



Citlivost součinitele přestupu tepla ve fluidní vrstvě na použitý střední průměr částic

Jan OPATRIL^{1,2}, Jan HRDLIČKA²*

¹ Univerzitní centrum energeticky efektivních budov ČVUT v Praze, Trinecká 102, Buštěhrad 273 43

² ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav energetiky, Technická 4, 166 07 Praha 6

* **Email:** jan.opatril@fs.cvut.cz

Spalování tuhých paliv ve fluidních kotlích se stacionární vrstvou je jednou z oblastí energetiky, která nabízí značný potenciál zejména v oblasti malých výkonů pro decentralizovanou výrobu. V rámci výpočtů fluidních kotlů s bublinkovou fluidní vrstvou je nezbytné pro správný návrh teplosměnné plochy stanovit součinitel přestupu tepla z fluidní vrstvy do této plochy. Článek uvádí vybrané dostupné korelace, pro které jsou následně porovnány rozdíly při použití obecně používaného středního průměr částic vůči mediánu a modu, které jsou v některých případech používány jako vhodnější alternativa. Porovnání je provedeno jak pro popelovou fluidní vrstvu, tak i pro alternativní inertní materiál, který je vhodný pro spalování biomasy. Výpočet je orientován na rozsah běžných provozních podmínek fluidních kotlů se stacionární fluidní vrstvou, respektive v rozmezí rychlosti fluidace od 1 až po 3 m/s při teplotě 850 °C. U výpočtových vztahů bylo zjištěno rozdílné chování a současně také značný rozptyl v hodnotách.

Klíčová slova: přestup tepla, fluidní vrstva, průměr částic, keramzit

1 Úvod

Decentralizovaná energetika se vyznačuje zejména svojí orientací na produkci v místě spotřeby a vysokou účinnost transformace energie. Zahrnuje širokou škálu technologií a výkonů od desítek kW až po desítky MW [1]. V kombinaci s alternativními lokálně dostupnými palivy lze mezi perspektivní decentralizované energetické zdroje s vysokým potenciálem především pro střední a větší průmyslové provozy řadit fluidní technologii. Konkrétně je zde myšleno spalování v bublinkové fluidní vrstvě, které lze efektivně využít v oblasti malých a středních zdrojů.

Fluidní technologie jsou vhodným prostředkem pro energetické využití biomasy, především pro aplikace spalování. Zde je fluidní vrstva schopna zajistit intenzivní míchání udržující rovnoměrné rozložení procesu spalování a tím pádem i teplotního pole, z čehož plyne zásadní výhoda a to flexibilita vůči parametrům paliva, především výhřevnosti, obsahu popela a vody. Navíc při vhodné konstrukci ohniště lze spalovat paliva i s velmi vysokým obsahem vody, která jsou špatně spalitelná v kotlích ostatních typů.

Oproti spalování uhlí, kdy inertní materiál fluidní vrstvy generuje popelovina paliva, je u biomasy nezbytné použití externího inertního materiálu. Pro tyto účely lze velmi dobře použít



expandované keramické kamenivo, které je nazýváno keramzit (dále v textu označováno jako LWA). Jedná se pórovité částice s vysokou kulovitostí a nízkou hustotou.

Spolehlivé zajištění funkčnosti vyžaduje znalost chování fluidní vrstvy a to především z pohledu zajištění stabilní fluidace a přenosu tepla do teplosměnné plochy, kterou může být fluidní vrstva buď ohraničena, případně může být do fluidní vrstvy vnořena. Odvodu tepla z fluidní vrstvy pomocí teplosměnné plochy se využívá zejména v případech, kdy je žádoucí zvýšení objemového zatížení ohniště. Pro výpočty předaného množství tepla jsou využívány vztahy pro stanovení součinitele přestupu tepla z fluidní vrstvy do teplosměnné plochy. V těchto výpočtech se vyskytuje parametr nazývaný střední průměr částic, který však lze stanovit různými způsoby s velmi odlišnými výsledky. Někdy je využíváno statistických metod pro získání reprezentativního průměru částic. Jedná se konkrétně o medián a modus. Článek se zaměřuje právě na citlivost výpočtových vztahů součinitele přestupu tepla vůči použitému střednímu průměru částic. Dále jsou uvedeny porovnání pro konvenční inertní materiál v podobě ložového popela a především pro keramické kamenivo, které je vhodné pro nasazení v případě spalování biomasy. Zrnitost inertního materiálu totiž zcela zásadním způsobem ovlivňuje intenzitu přestupu tepla. [2]

2 Střední průměr částic

Střední průměr částic se určí pomocí síťového rozboru a to prosetím odebraného vzorku přes sadu sít. Získají se zůstatky materiálu na jednotlivých sítích a stanoví se křivka propadu společně s křivkou četnosti. Velmi často používaný střední průměr částic je v literatuře [2], [3] definován jako

$$d_m = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_{pi}}} \quad [\text{mm}] \quad (1)$$

Kde x_i je zůstatkový hmotnostní podíl na síti a d_{pi} je geometrický průměr sousedních sít mezi kterými se příslušná část vzorku nalézá. Obvykle je používán aritmetický průměr, nicméně matematicky přesnější vyjádření poskytuje průměr geometrický. Reálný dopad na výsledek se pohybuje na úrovni jednotek procent.

Matematicky lze distribuci částic popsat např. pomocí Rosin-Rammlerovy aproximace [4], která má pro křivku propadu tvar

$$P(x) = 1 - e^{-bx^n} \quad [-] \quad (2)$$

Zatímco aproximace křivky četnosti je ve tvaru

$$y(x) = bnx^{n-1}e^{-bx^n} \quad [\text{mm}^{-1}] \quad (3)$$

Kde b a n jsou koeficienty udávající tvar křivek nalezené pomocí metody nejmenších čtverců. Koeficient „ n “, tzv. koeficient stejnorodosti, lze rovněž využít pro interpretaci míry polydisperzity testovaného souboru částic. Teoreticky může nabývat hodnot $0 - \infty$, přičemž hodnota 0 znamená zcela polydisperzní systém částic (tj. každá částice má jinou velikost),



zatímco hodnota ∞ znamená monodisperzní směs, tj. všechny analyzované částice mají stejnou velikost.

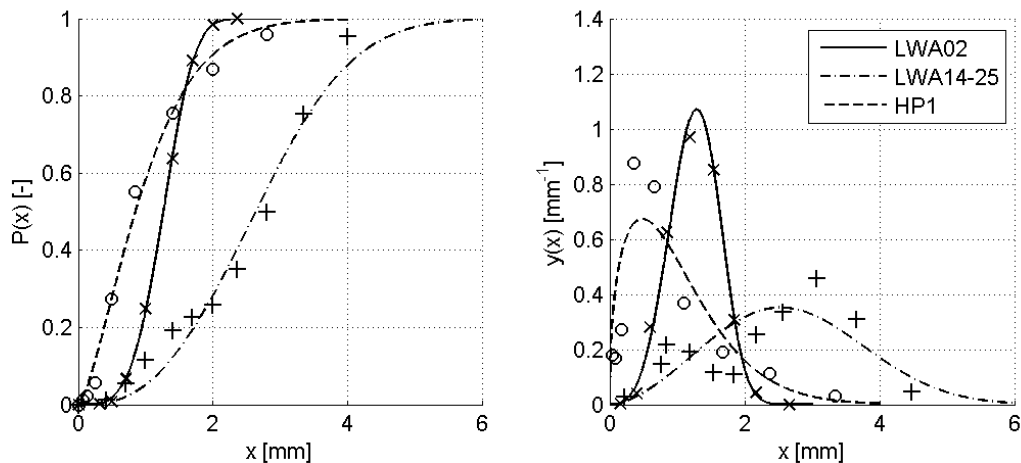
Modus průměru částic odpovídá bodu, kde křivka četnosti dosahuje svého maxima

$$y(x)_{max} \sim x_{mod} \quad (4)$$

Medián je nalezen řešením rovnice

$$e^{-bx^n} = 0,5 \quad (5)$$

Vlastnosti použitých inertních materiálů včetně nalezených koeficientů aproximace a mediánu s modem uvádí Tab. 1. Rosin-Rammlerova aproximace křivek propadu a četnosti pro použité materiály ukazuje Obr. 1. Z porovnání uvedených grafů vyplývá, že LWA má výrazně užší distribuci částic v porovnání se vzorky popela.



Obr. 1 Rosin-Rammlerova aproximace křivky propadu a křivky četnosti

Tab. 1 Vlastnosti použitých inertních materiálů

	Sypná hustota	Hustota zrn	Střední průměr	Medián	Modus	Koeficient b	Koeficient n
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]
LWA-02	571	1088	1,124	1,266	1,289	0,2761	3,9033
LWA-14-25	476	899	1,873	2,632	2,532	0,0526	2,6644
Popel HP1	787	2195	0,491	0,850	0,480	0,8755	1,4381

3 Přenos tepla ve fluidní vrstvě

Přenos tepla z fluidní vrstvy do teplosměnné plochy je složitý proces, při kterém se uplatňují všechny tři principy přestupu tepla a to konvekce, radiace a kondukce, která má však minoritní podíl. V rámci fluidní vrstvy je tedy celkový součinitel přestupu tepla h_b rozdělován



na radiační složku h_r , plynnou konvekci h_{gc} a částicovou konvekci h_{pc} . Obě konvektivní složky bývají sdružovány dohromady (h_c). Podrobnější popis přestupu tepla ve fluidní vrstvě uvádí [5]. V rámci této práce je soustředěna pozornost právě na tuto souhrnnou konvekci, kterou lze vyčíslit na základě rovnic prezentovaných v [2], kde jsou detailně popsány. Použité vztahy v porovnávacích výpočtech označované dle jejich autorů shrnuje Tab. 2.

Tab. 2 Vztahy pro výpočet konvektivní složky součinitele přestupu tepla ve fluidní vrstvě

Autor	Vztah	
Vreedenberg	$\frac{h_c D_t}{k_g} = 0.66 Pr_g^{0.3} \left(\frac{\rho_s (1 - \epsilon)}{\rho_g \epsilon} \right)^{0.44} Re_D^{0.44}$	(6)
Andeen a Glicksman	$\frac{h_c D_t}{k_g} = 900 (1 - \epsilon) \left(\frac{\rho_s}{\rho_g} Pr_g \frac{\mu_g^2}{g \rho_s^2 d_p^3} \right)^{0.3} Re_D^{0.3}$	(7)
Martin	$\frac{h_c d_p}{k_g} = Z (1 - \epsilon) \left(1 - e^{-\frac{N}{cZ}} \right)$	(8)
Molerus	$\frac{h_c l}{k_g} = \frac{0.125 \epsilon_{s,mf}}{B_1 \left[1 + B_2 \left(\frac{k_g}{2 c_{ps} \mu_g} \right) \right]} + 0.165 Pr_g^{1/3} \left(\frac{\rho_g}{\rho_s - \rho_g} \right)^{1/3} \frac{1}{B_3}$	(9)
Borodulya	$\frac{h_c d_p}{k_g} = 0.074 Ar^{0.1} \left(\frac{\rho_s}{\rho_g} \right)^{0.14} \left(\frac{c_{ps}}{c_{pg}} \right)^{0.24} \epsilon_s^{2/3} + 0.46 Re_p Pr_g \frac{\epsilon_s^{2/3}}{\epsilon}$	(10)
Leva	$\frac{h_c d_p}{k_g} = 0,525 Re_p^{0,75}$	(11)
Wender a Cooper	$\frac{h_c d_p}{k_g} = 3,51 \cdot 10^{-4} C_R (1 - \epsilon) Re_p^{0,23} \left(\frac{c_{pg} \rho_g}{k_g} \right)^{0,43} \left(\frac{c_{ps}}{c_{pg}} \right)^{0,8} \left(\frac{\rho_s}{\rho_g} \right)^{0,66}$	(12)

Ve výpočtech je uvažováno se spalinami z dřevní štěpky o vlhkosti 30 % s přebytkem vzduchu 1,4. Vlastnosti spalin jsou stanoveny dle postupů uvedených v literatuře [6] a [7]. Výpočty jsou provedeny v rozsahu fluidační rychlosti 1 až 3 m/s pro jednu referenční teplotní úroveň 850°C. Zvolená teplota a rozsah rychlosti zhruba odpovídá běžným provozním podmínkám fluidních kotlů se stacionární fluidní vrstvou. Referenční teplota byla použita pouze jedna a to z důvodu, že v rozpětí teplot obvyklých teplot 800 až 900°C mají průběhy jednotlivých vztahů přibližně ekvidistantní charakter, viz výsledky prezentované v [5].

Porovnání výpočtů je založeno na směrodatné odchylce σ společně s variačním koeficientem v . Referenčním stavem je zde hodnota y_{i_r} , získaná pro střední průměr d_m , vůči níž jsou porovnány hodnoty mediánu, respektive modu y_{i_m} .

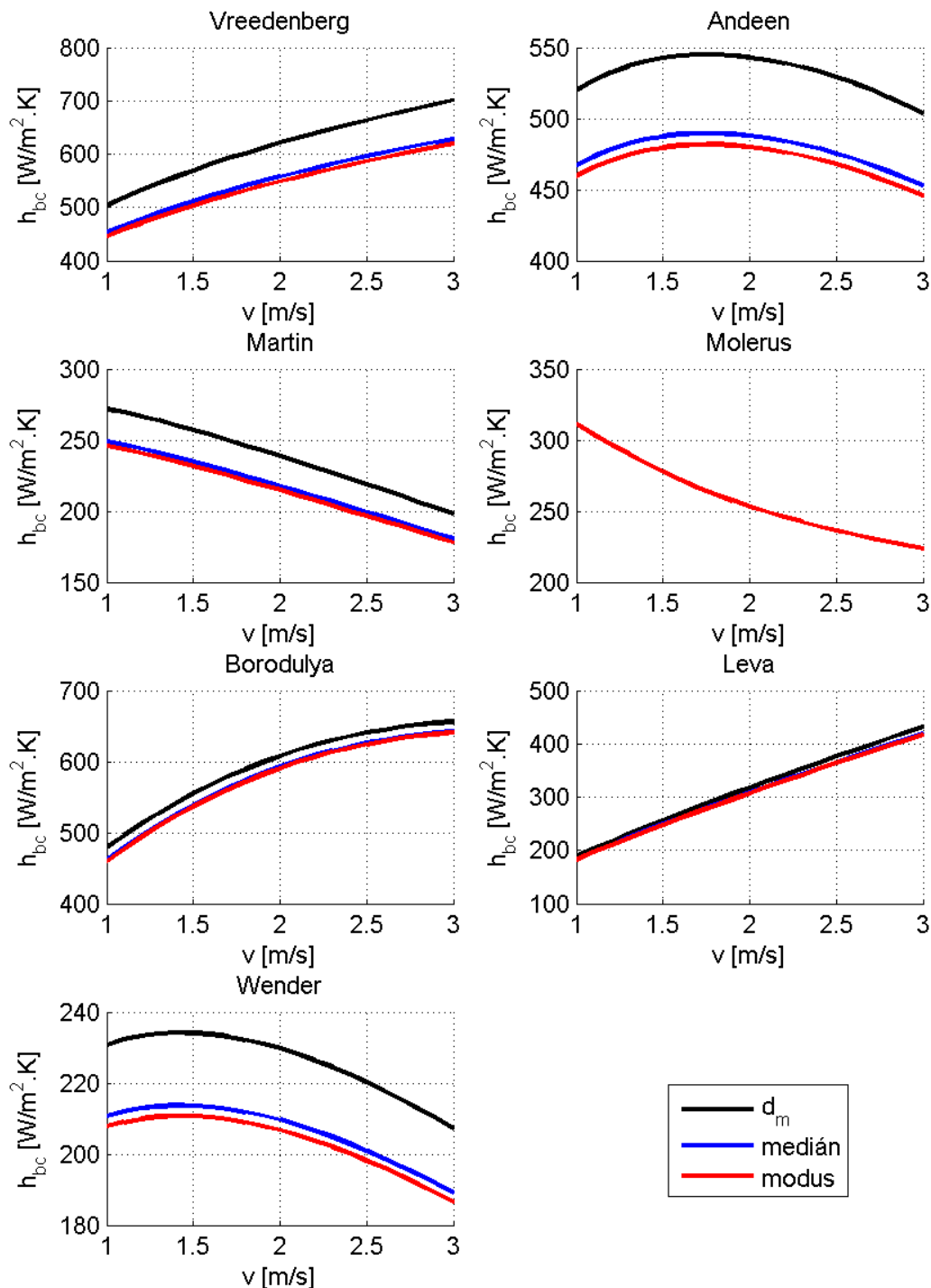
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{i_r} - y_{i_m})^2} \quad (13)$$



$$v = \frac{\sigma}{\mu_m} 100 \quad (14)$$

Kde μ_m je aritmetický průměr hodnot referenčního stavu.

Pro názornost jsou zde na Obr. 2 v grafické podobě uvedeny průběhy pro materiál LWA-02, kde zajímavou skutečností je výpočet dle Moleruse, který nemá na použitý průměr vliv. Je to způsobeno silnou vazbou na minimální fluidační rychlost. Prahová fluidace je charakteristickou vlastností fluidní vrstvy a v tomto případě byla uvažována vždy u daného materiálu jednotná pro všechny průměry.



Obr. 2 Porovnání konvektivní složky pro střední průměr částic, medián a modus



Souhrnné výsledky všech materiálů uvádí Tab. 3, kde lze vyčíst, že citlivost použitých rovnic na střední průměr částic je značně rozdílná. Velmi nízké hodnoty relativní odchylky vykazují Leva a Borodulya, což je nejlépe vidět na popelové vrstvě. Pokud porovnáme medián a původní hodnotu průměru, tak dochází k navýšení přibližně o 73 %, zatímco přestup tepla poklesne o 17,2 % (Leva), respektive 13,0 % (Borodulya). Výrazně citlivější jsou všechny zbylé výpočtové vztahy, jejichž relativní chyba se řádově pohybuje na stejné úrovni.

Rozdílné chování vykazuje modus pro keramzit a popel. U popela se jeho hodnota pohybuje v těsné blízkosti původního středního průměru. Tato skutečnost byla pozorována i u popelové vrstvy vzniklé spálením uhlí Mibrag, která však nebyla do srovnání zařazena. Použitím modu u popelové vrstvy se dosáhne velmi obdobných výsledků jako u původního středního průměru.

U obou keramzitů jsou hodnoty modu a mediánu velmi blízko sebe a tím pádem jsou i velmi malé vzájemné rozdíly.

Tab. 3 Porovnání výsledků výpočtů konvektivní složky součinitele přestupu tepla

		(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
LWA-02								
Medián	v [%]	10,2	10,2	8,8	0	2,6	3,0	8,8
	σ [W/m ² .K]	62,6	54,0	20,8	0	15,3	9,5	19,8
Modus	v [%]	11,7	11,6	10,0	0	3,0	3,5	10,0
	σ [W/m ² .K]	71,5	61,7	23,8	0	17,5	10,9	22,6
LWA-14-25								
Medián	v [%]	26,5	26,4	24,2	0	5,1	8,4	23,1
	σ [W/m ² .K]	108,8	93,9	38,3	0	27,1	23,2	31,0
Modus	v [%]	23,9	23,8	21,8	0	4,6	7,5	20,7
	σ [W/m ² .K]	98,0	84,6	34,4	0	24,4	20,7	27,9
Popel HP1								
Medián	v [%]	38,7	38,6	33,3	0	17,2	13,0	34,2
	σ [W/m ² .K]	389,8	196,3	84,6	0	79,9	49,3	102,2
Modus	v [%]	2,8	2,8	2,2	0	1,2	0,8	2,4
	σ [W/m ² .K]	28,4	14,3	5,6	0	5,5	3,0	7,2

4 Závěr

Nejnižší citlivost na střední průměr částic vykazují vztahy Borodulya (10) a Leva (11). U výpočtu dle Moleruse (9) nemohla být citlivost vyčíslena, protože se jedná pouze o jinou interpretaci středního průměru částic a minimální fluidační rychlost se nemění. Neznamená to však, že by Molerus nereagoval na změnu velikosti částic vrstvy. Pokud dojde ke skutečné



změně průměru, při zachování hustot a kulovitosti, tak se změní rychlost prahové fluidace s dopadem na výslednou hodnotu.

Pro oba dva druhy inertních materiálů použití mediánu znamená výrazný pokles součinitele přestupu tepla. U modu je situace odlišná a to v případě popela HP1, kdy dochází k velmi mírnému nárůstu součinitele.

Z výsledků plyne, kromě rozdílné citlivosti rovnic na střední průměr částic, značný rozptyl ve vypočtených hodnotách. Otázkou jsou tedy velmi výrazné odlišnosti v absolutní hodnotě součinitele přestupu tepla, která je patrná z Obr. 2. Na základě předběžného vyhodnocení experimentů lze očekávat hodnoty konvektivní složky pro zde použité keramzity řádově na úrovni 100 až 150 W/m².K a pro jemnější částice popela o něco výše a to 150 až 200 W/m².K. Potom by se skutečným hodnotám nejvíce přiblížil výpočet založený na použití hodnoty mediánu a to jak pro keramzit, tak i pro popel.

Poděkování

Tato práce vznikla za podpory Evropské unie, projektu OP VaVpI č. CZ.1.05/2.1.00/03.0091 – Univerzitní centrum energeticky efektivních budov.

Použitá literatura

- [1] KOORNNEEF, J., JUNGINGER, M., FAAIJ, A. Development of fluidized bed combustion – An overview of trends, performance and cost. *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 33, Issue 1, February 2007, Pages 19-55. ISSN 0360-1285.
- [2] YANG, W.C. *Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems*. Marcel Dekker Incorporated, 2003. ISBN 0-8247-0259-X.
- [3] HOWARD, J.R. *Fluidized Bed Technology: Principles and Applications*. Taylor & Francis, 1989. ISBN 0-8527-4055-7.
- [4] Bartsch, H. J. *Matematické vzorce*. SNTL, 1983.
- [5] OPATRIL, J., HRDLIČKA, J. Přenos tepla ve stacionární fluidní vrstvě pro spalování biomasy. *Energie z biomasy XV*, 2014, Lednice.
- [6] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*. ČVUT v Praze, 2007. ISBN 978-80-01-03757-7.
- [7] ČERNÝ, Václav, JANEBA, Břetislav, TEYSSLER, Jiří. *Parní kotle*. SNTL, Praha 1983.