

Prof. Ing. Pavel Noskiewicz, CSc., Ing. Jiří Horák,
Výzkumné energetické centrum, VŠB – Technická univerzita Ostrava

Výzkum spalování v malých uhelných kotlích

Untersuchung der Verbrennung in kleinen Kohlenkesseln

Die Energetik dieser Zeit ist gezwungen, insbesondere zwei Grundfragen zu lösen: wirtschaftliche und environmentale. Was sich der Heizungskessel betrifft, zeigt sich ein erhöhtes Interesse über die Kohleverbrennung, eines heimischen Brennstoffes, mit langfristiger Gewähr einer Preisstabilität. Das Zurückkehren zur Kohle kann aber nicht ein Weg zurück sein. Moderne Kessel müssen neben einer hohen Wirksamkeit annehmbar niedrige Emissionskonzentrationen von Schadstoffen sichern. Wie zeigt die Analyse des Verbrennungsprozesses in Kesseln der kleinen Leistungen, sollte auch weiterhin die Möglichkeit der Kohleverbrennung für Heizung der kleineren Objekte erhalten, muss sich ihre Verbrennungstechnologie geändert werden. Der Beitrag legt die Ergebnisse der Betriebsversuche erreichbaren heimischen Kesseltype vor, macht bekannt mit der Diskussion zu dieser Problematik und analysiert Verlauf des Verbrennungsprozesses und seine Wirkung auf die Schadstoffbildung. Den Anforderungen des 21. Jahrhunderts können nur die Kessel mit kontinuierlicher Brennstoffzuführung gerecht werden.

Research after combustion in small boilers

Current energetics is made solve mainly two basic issues: economical and environmental. In the case of boilers for heating, there is appearing a current interest in combustion of coal, house fuel with a long-term guarantee of the price stability. But the return of coal may not be the way back. Modern boilers must secure, except high effectiveness, acceptable low concentrations of harmful substances emissions. As shown by the analysis of the combustion process in boilers of low outputs, the technology of combustion of coal must be changed, if the possibility to

use coal for heating smaller objects shall be preserved even from now on. The article presents the results of operation tests of available types of these boilers, discussion on these results, analyzes the course of the combustion process and its influence upon the harmful substances generation. Only the boilers with a continuous supply of fuel may meet the requirements of the 21st century.

Исследование сжигания угля в небольших котлах

Современная энергетика вынуждена решить в особенности два ключевых вопроса: экономический и экологический. В случае котлов для отопления отмечается сегодня повышенный интерес к сжиганию угля - отечественного топлива с долгосрочной гарантией стабильных цен. Однако, возвращение угля на сцену не может быть шагом назад. Современные котлы должны, кроме высокого к.п.д., обеспечивать приемлемые низкие концентрации выделения вредных веществ. Как показывает анализ процесса сгорания в котлах небольших мощностей - если и впредь сохранить возможность использования угля для отопления меньших объектов - необходимо изменить технологии его сжигания. Статья представляет результаты проб эксплуатации доступных отечественных типов таких котлов, занимается дискуссией над этими результатами, анализирует ход процесса сгорания и его влияние на образование вредных веществ. Требованиям 21-ого века могут отвечать только котлоагрегаты с бесперебойной подачей топлива.

Výzkum spalování v malých uhelných kotlích

Současná energetika je nucena řešit zejména dvě zásadní otázky: ekonomickou a environmentální. V případě kotlů pro vytápění se dnes projevuje zvýšený zájem o spalování uhlí, domácího paliva s dlouhodobou zárukou cenové stability. Návrat uhlí ale nemůže být cestou zpět. Moderní kotle musí vedle vysoké účinnosti zajistit přijatelně nízké emisní koncentrace škodlivin. Jak ukazuje analýza spalovacího

procesu v kotlích malých výkonů má-li být i nadále zachována možnost používat uhlí k vytápění menších objektů, musí se změnit technologie jeho spalování. Článek předkládá výsledky provozních zkoušek dostupných domácích typů těchto kotlů, diskusi těchto výsledků, analyzuje průběh spalovacího procesu a jeho vliv na tvorbu škodlivin. Požadavkům 21. století mohou vyhovět pouze kotle s kontinuálním přívodem paliva.

K vytápění rodinného domku je zapotřebí kotle o výkonu nanejvýš několika málo desítek kilowat. Záleží to na lokalitě, celkové dispozici, konstrukci a způsobu jeho užívání. Tepelné ztráty moderních domků se vyjadřují v jednotkách kilowat. Stále aktuální otázkou bude jak zajistit dodávku tepla, jaké zvolit palivo, jaký kotel a za jakou cenu. Nabídka je dnes pestrá a platí, že cena roste s uživatelským komfortem. Ceny energie se trvale vyvíjí a kdo by chtěl dohlédnout na konec tohoto vývoje, neuspěje. Takový konec neexistuje a trvalý růst ceny energie má charakter přírodního zákona.

Současná energetika, chápaná v širokém pojetí jako zásobování energií, je nucena řešit zejména dvě zásadní otázky – ekonomickou a environmentální. Ty jsou v přirozeném rozporu a přijatelné řešení může být jedině kompromisem. Složitou situaci si začínáme stále více uvědomovat a poznání bývá někdy trpké. Mnozí se bolestně vyléčili z počátečního nadšení elektrokotly a rozsáhlé plynofikace a došli k názoru, že stávající cenu už nejsou ochotni platit. Hledají proto nová řešení a pro nedostatek informací se vracejí k tomu, co dobře znají: k uhlí. Díky nedostatečné nabídce se znovu ožívují zastaralé a dnešním požadavkům nevyhovující technologie jeho spalování, což přirozeně vzbuzuje obecnou nevoli. Jenže uhlí za to nemůže. Neexistuje totiž špatné palivo, může však existovat nevhodné spalovací zařízení.

K základním principům rozvoje energetiky patří úsilí o využívání všech dostupných zdrojů energie. Toto úsilí má v konečných důsledcích vždy negativní vliv na životní prostředí a hledání kompromisů jako přijatelně vyhovujících technických řešení je cílem výzkumu a vývoje. V minulých letech jsme zaznamenali velmi intenzivní rozvoj využívání zemního plynu jako paliva pro malé výkony. Není se čemu divit. Ve srovnání s jinými palivy nabízí zemní plyn bezkonkurenční výhody - téměř konstantní kvalitu, možnost snadné a spolehlivé regulace, jednoduchý princip spalování, environmentálně přátelské složení spalin, univerzální využití, vysoký uživatelský komfort a dosud vlídně stanovenou cenu. Díky všem těmto výhodám zemní plyn dnes definitivně zvítězil v oblasti malých výkonů v konkurenci s uhlím a výzkum a vývoj v oblasti malých uhelných kotlů se téměř zastavil.

Současné oživení zájmu o tyto kotle je přirozenou reakcí na postupující cenovou liberalizaci, potvrzuje potřebu široké nabídky možností a i s ohledem na dosud pozoruhodné domácí zásoby uhlí naznačuje, že ještě není vše ztraceno. Může však být, nebude-li zájemcům k dispozici dostupná nabídka vhodných systémů vytápění uhlím. Systémů, zahrnujících jak spolehlivou dodávku vhodného paliva požadované kvality, tak i kotel, schopný kvalitně a efektivně toto palivo spalovat. Hovoříme zde obecně o palivu,

protože se nemusí jednat výhradně o uhlí, ale může jít také, a dokonce velmi progresivně, o nejrůznější formy biomasy. Ať už samotné, nebo v kombinaci s uhlím. Vždy se bude jednat o spalování tuhých paliv, řídící se stejnými principy.

Způsoby spalování uhlí v malých ohništích

Především je nutné říci, že velkou nevýhodou uhelné energetiky obecně je náročná manipulace s palivem, snižující uživatelský komfort. Manipulace s palivem a se zbytky po spalování není rozhodně příjemnou činností. V případě velkých výkonů představuje podstatné zvýšení investičních i provozních nákladů a je náročná i energeticky. U malých výkonů je to obdobné, není ale zvykem takto topení uhlím hodnotit. Naopak, zvýšenou pracnost považuje provozovatel za osobní příspěvek ke snížení provozních nákladů.

Z odborného hlediska je možné rozdělit užívané způsoby spalování do dvou skupin. První z nich představují kotle s prohořivacím ohništěm, které se ručně jednorázově naplní uhlím, jež pak postupně odhořívá. Schéma takového ohniště je uvedeno na obr. 1.

Celá dávka uhlí se spaluje najednou, byť pomalu a výsledkem je značné kolísání tepelného výkonu, účinnosti spalování i emisních koncentrací škodlivin ve spalínách. Tento spalovací princip je velmi jednoduchý, vyžaduje častou obsluhu a z pohledu 21. století kazí pověst uhlí jako zdroje energie pro vytápění. Díky nízké ceně, velké univerzálnosti a minimálním nárokům na kvalitu a druh paliva však stále převládá v domácích uhelných kotelnách.

Na kotli tohoto typu byly na pracovišti autorů provedeny podrobné spalovací zkoušky. Byly při nich spalovány černouhelné brikety o výhřevnosti $22,4 \text{ MJkg}^{-1}$, obsahu popeloviny přes 25 % a obsahu síry cca 0,8 %. Podstatné informace o průběhu spalování při dvouhodinové zkoušce s množstvím uhlí, které odpovídá průměrnému výkonu 32 kW, udává obr. 2.

Křivky, popisující průběh hoření, jsou zobecněné, nicméně odpovídají reálným provozním podmínkám zkoušky, tj. průměrnému výkonu 32 kW, spotřebě paliva 9 kg/hod a průměrnému součiniteli přebytku vzduchu 1,6.

Klíčovým parametrem, charakterizujícím průběh spalovacího procesu, je v tomto případě úbytek paliva Δh – vyhoření. Jeho časový průběh lze získat kontinuálním vážením kotle v průběhu zkoušky. (Uvedená křivka Δh je korigována na obsah popela). Po přiložení paliva do roztopeného kotle začíná proces vzněcování a hoření a jak ukazuje průběh křivky Δh , až do zhruba čtyřicáté minuty rychlost úbytku paliva roste. Zde má křivka inflexní bod, za kterým proces zpomaluje. Prchavá hořlavina a drobnější frakce již vyhořely a dále již dohořívá koksový zbytek.

Derivací křivky vyhoření paliva Δh lze snadno získat křivku rychlostí hoření w_H

$$w_H = \frac{d(\Delta h)}{d\tau}.$$

Rychlost hoření určuje okamžité množství uvolněného tepla, tedy tepelný výkon. Je zřejmé, že tepelný výkon od počátku cyklu roste, svého maxima dosahuje v oblasti inflexního bodu křivky vyhoření a poté již trvale klesá. Celý tento proces je uživatelsky charakterizován průměrnou hodnotou tepelného výkonu, nebo-li jak je uvedeno na obr. 2, průměrnou rychlostí hoření. V případě popisované zkoušky je průměrná rychlost hoření $w_H = 9 \text{ kg/hod}$, což odpovídá při výhřevnosti $Q_i^r = 22,4 \text{ MJ/kg}$ tepelnému výkonu

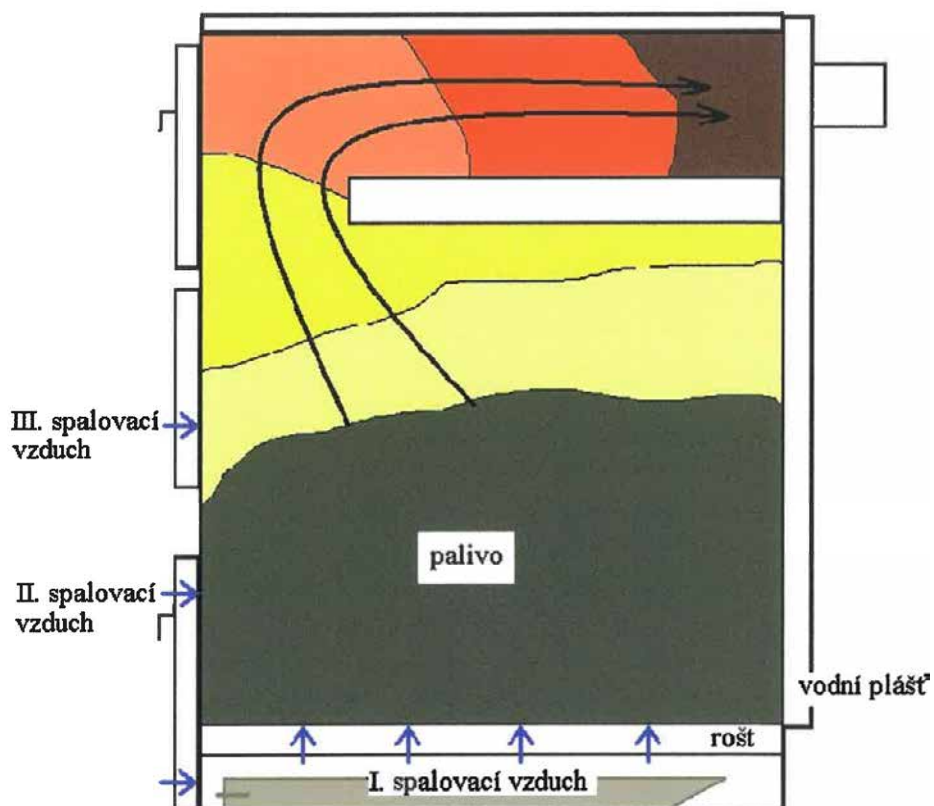
$$P_{tep} = \frac{w_H \cdot Q_i^r}{\tau} = \frac{9 \cdot 22400}{3600} = 56 \text{ kW}.$$

Jedná se zde o tepelný výkon ohniště, udávající množství tepla uvolněného spalováním daného paliva. Je to vlastně tepelný příkon kotle jeho výměníku tepla, v němž se toto ve spalínách obsažené teplo předá vodě, jako topnému médiu. Celý proces je poznamenán nedokonalostí, projevující se ztrátami a sumárně pak ztráty vyjadřujeme účinností kotle. (V tomto případě byla účinnost kotle mimořádně nízká).

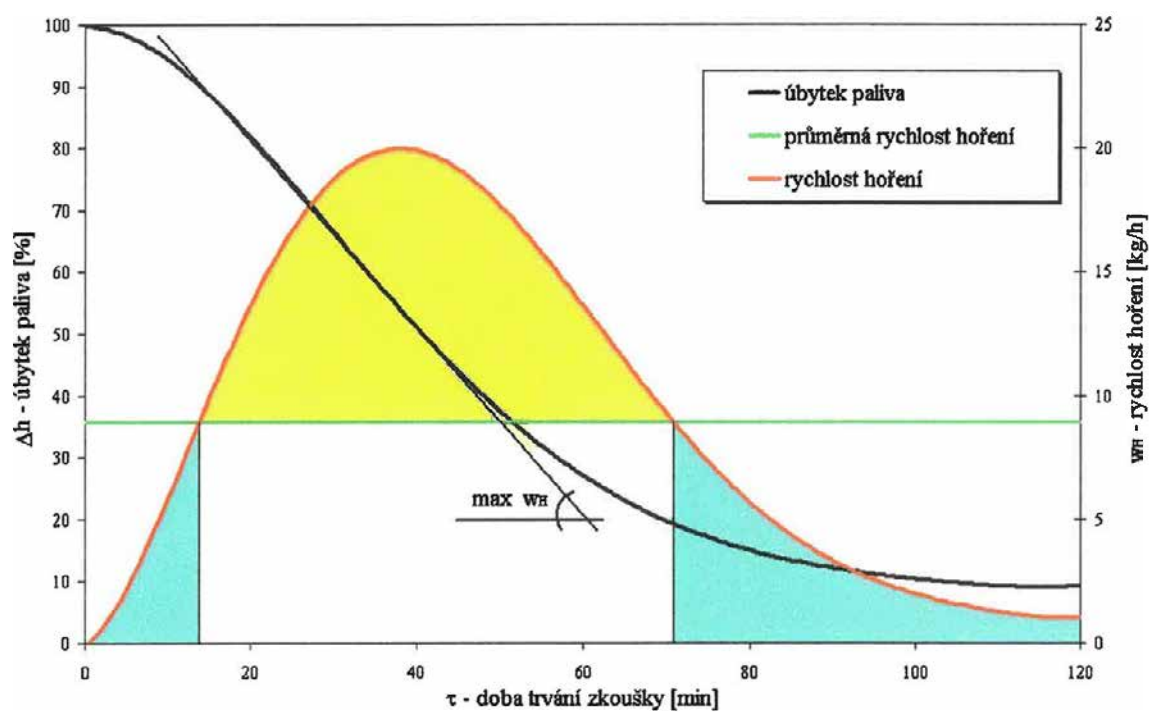
Při běžném provozu je kotel nastaven na průměrné provozní hodnoty. Průměrnému tepelnému výkonu ohniště odpovídá průměrná rychlost hoření paliva, do ohniště je přiváděno tomu odpovídající průměrné množství spalovacího vzduchu stanovené tak, aby byl průměrný součinitel přebytku vzduchu optimální. Všechny tyto průměrné hodnoty jsou určeny z doby trvání jednoho cyklu, tj. jednoho přiložení nového paliva. Dodávka spalovacího vzduchu do ohniště je však konstantní a odpovídá střední rychlosti hoření (obr. 2). Protože je skutečný průběh spalovacího procesu proměnlivý, nalezneme zde vždy dvě oblasti, lišící se relativním množstvím vzduchu, aktuálně přítomným v ohništi. Při zapalování paliva a při dohořívání koksového zbytku, tedy v případě malé rychlosti hoření, je v ohništi nadbytek spalovacího vzduchu (vyznačeno modře), zatímco v oblasti maximální rychlosti hoření (vyznačeno žlutě) je v ohništi méně spalovacího vzduchu, než odpovídá požadovanému průměrnému (optimálnímu) součiniteli přebytku vzduchu.

Právě v oblasti maximální rychlosti hoření spočívá klíčový problém těchto ohnišť. Po zapálení paliva se spalovací proces přirozeně rozvíjí k vyšší rychlosti hoření a přednostně se spalují prchavé složky hořlaviny. To vyžaduje zvýšený přívod spalovacího vzduchu, který však je ze samotného principu spalování nedostačující. Výsledkem je nedokonalé spalování s vysokým obsahem oxidu uhelnatého a dalších nežádoucích produktů nedokonalého spalování ve spalínách. Nastavení přívodu vzduchu na vyšší úroveň jeho přebytku vyřeší problém jen částečně, protože se nemůže podařit úspěšně zvládnout celou oblast vysoké rychlosti hoření a navíc trvale příliš vysoký přebytek vzduchu výrazně sníží účinnost kotle v oblasti malé rychlosti hoření. Praktickým důsledkem by pak bylo zvýšení výkonu kotle, zvýšení spotřeby paliva a nutnost častějšího přikládání, takže nezbyvá než chodit ručně nastavovat regulaci.

Průběh spalovacího procesu, popsany na obr. 2, se výrazně projeví na provozních parametrech kotle. Příkladem je na obr. 3 uvedený časový průběh jedné spalovací zkoušky, popsany koncentrací kyslíku, oxidu uhelnatého a oxidu siřičitého ve spalínách za kotlem a výstupní teplotou spalin.



Obr. 1 Schéma prohořivacího ohniště



Obr. 2 Časový průběh spalování jednorázově přiložené dávky uhlí

Uvedené naměřené parametry plně potvrzují závěry, učiněné při analýze spalovacího procesu v ohništi podle obr. 2. Zapálení paliva v počáteční fázi cyklu a rychlý rozvoj procesu hoření zde potvrzuje poměrně rychlý růst teploty spalin na výstupu z kotle. Vysoká rychlost hoření znamená také intenzivní spotřebu kyslíku a protože je v této fázi cyklu skutečný přebytek vzduchu v ohništi snížen, klesá výrazně obsah kyslíku ve spalinách za kotlem a naopak roste obsah oxidu uhelnatého. V čase největšího nedostatku kyslíku je skutečná hodnota součinitele vzduchu cca 1,2, což je nedostačující. Spalovací podmínky se zlepšují až po překročení maximální rychlosti hoření. Na obrázku je uveden také časový průběh emisní koncentrace oxidu siřičitého. Jeho problematice bude věnována pozornost později, nicméně stojí za pozornost, že v počáteční fázi zapalování je jeho emisní koncentrace velmi nízká a pozoruhodně narůstat začíná až v době, kdy koncentrace oxidu uhelnatého dosáhla maxima a začíná klesat.

Kotle s popsáním způsobem spalování jsou typickým příkladem použití nevhodného spalovacího zařízení pro palivo, které za nic nemůže. Popsané potíže čekají většinu tuhých paliv, včetně upravených druhů biomasy. Přesto však existuje palivo, pro které může být tento způsob spalování vhodný. Protože je klíčovou potíží nemožnost dokonale spálit velké množství plyných hořlavých složek, uvolňujících se z uhlí bezprostředně po jeho zapálení, je reálné uvažovat o spalování paliva s nízkým obsahem prchavé hořlaviny. Paliva tohoto druhu jsou označována jako bezdýmá paliva, je známa řada pokusů o jejich komerční produkci a klasickým bezdýmým palivem je koks. Při jeho použití je ovšem nutno se smířit s vyšší cenou ve srovnání s uhlím. Alternativou může být použití vhodnějšího spalovacího zařízení.

Jestliže jednorázové přikládání velké dávky uhlí do velkoprostorového prohořivacího ohniště představuje jeden extrém, je druhým extrémem, druhou skupinou, kontinuální přívod uhlí do ohniště. Z úvah, naznačených na obr. 2 je logické, že kontinuální přívod paliva popisované problémy rasantně vyřeší, neboť rychlost hoření bude konstantní. Je to ovšem víceméně teoretická možnost. Kotel by musel být dimenzován a seřízen pro konkrétní uhlí a provozován trvale při konstantním výkonu.

Není bez zajímavosti, že se v zemích, kde je racionální hospodaření s energií nezbytností, již dnes navrhují a realizují systémy vytápění se zásobníkem horké vody, aby mohl být kotel provozován pouze při jmenovitém výkonu a tedy s maximální účinností. Po naplnění tepelné kapacity zásobníku se kotel odstaví.

Kontinuální přívod uhlí do ohniště vytváří vhodné podmínky pro stabilní hoření s neměnnými parametry spalování. Nemění-li se jeho parametry, je poměrně snadné zajistit kvalitní průběh spalovacího procesu, tj. vysokou účinnost spalování (minimální nedopal) a přijatelně nízké emisní koncentrace těch škodlivin, které jsou produkty nedokonalého spalování. Objevují se však jiné problémy. Především není snadné zajistit spolehlivou dopravu uhlí ze zásobníku, který je obvykle součástí kotle, do ohniště. Nabízí se tři odlišné způsoby dopravy:

- uhlí je ze zásobníku odebíráno otáčivým bubnovým roštem,
- dopravu do ohniště zajišťuje zapouzdřený šnekový dopravník,
- superjemný uhelný prášek je foukán do ohniště spalovacím vzduchem.

Všem uvedeným způsobům dopravy je společný zvýšený nárok na granulometrii uhlí, tedy na jeho úpravu. Není již možné naplnit zásobník libovolným uhlím, ale je nutné používat to, které je pro daný kotel předepsáno. Nezbytná úprava uhlí samozřejmě

zvýší jeho cenu. Z hlediska spolehlivosti dopravy do ohniště má největší význam granulometrie. Šnekový dopravník nezvládne nadměrné kusy, stejně jako uhlí s vysokým podílem jemných frakcí. Je také nutné pamatovat na to, že všechny uvedené způsoby dopravy jsou založeny na objemovém principu, tj. přemísťují objem a nikoli hmotnost, zatímco spalovací proces je určen hmotovou bilancí. Jeden krychlový metr černého uhlí obsahuje mnohem více chemicky vázané energie, než stejný objem hnědého uhlí a dopravní systémy budou v těchto případech pro stejný tepelný výkon odlišně dimenzovány. Ukazuje se, že mají-li být respektovány současné náročné požadavky, nemůže existovat univerzální kotel, ale je nutné vyvíjet a nabízet systém zahrnující i palivo.

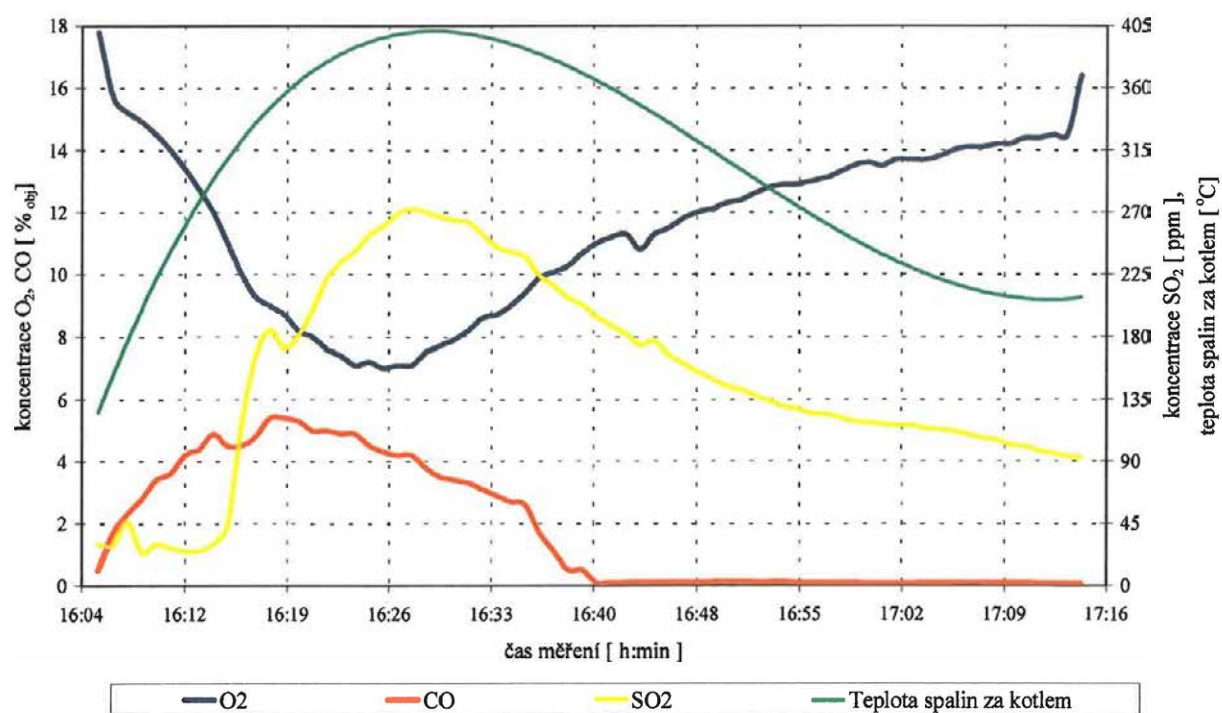
Vhodným příkladem kontinuálního způsobu spalování uhlí je ohniště, schematicky popsané na obr. 4, jehož princip byl před více než deseti lety vyvinut anglickou společností Coal Research Establishment (CRE).

Uhlí je z kotlového zásobníku dopravováno šnekovým dopravníkem do dolní části retorty, v níž odhořívá. Nově přiváděné uhlí vytlačuje obsah retorty nahoru, takže popel setrvává na povrchu hořícího uhlí a později přepadává přes její okraj do popelníku. Spalovací proces je řízen podle požadovaného výkonu tak, že se mění délka intervalu podávání paliva (nejde tedy o kontinuální přívod paliva v plném smyslu slova), se kterým je vhodně svázán provoz vzduchového ventilátoru. Diskontinuita dodávky paliva je nezbytná, má-li být zachována možnost regulace výkonu. Dosahuje se jí změnou délky intervalu podávání a intervalu prodlevy. Rovnoměrnost spalovacího procesu dokládá na stejných parametrech, jako v předchozím případě, obr. 5. Je na něm uveden téměř dvouhodinový záznam ze spalovací zkoušky s černým uhlím o výhřevnosti 25,4 MJ/kg, obsahujícím cca 12 % popeloviny a méně než 0,4 % síry. Zkouška byla prováděna při tepelném výkonu kotle 23 kW, což umožňuje přijatelné srovnání obou způsobů spalování.

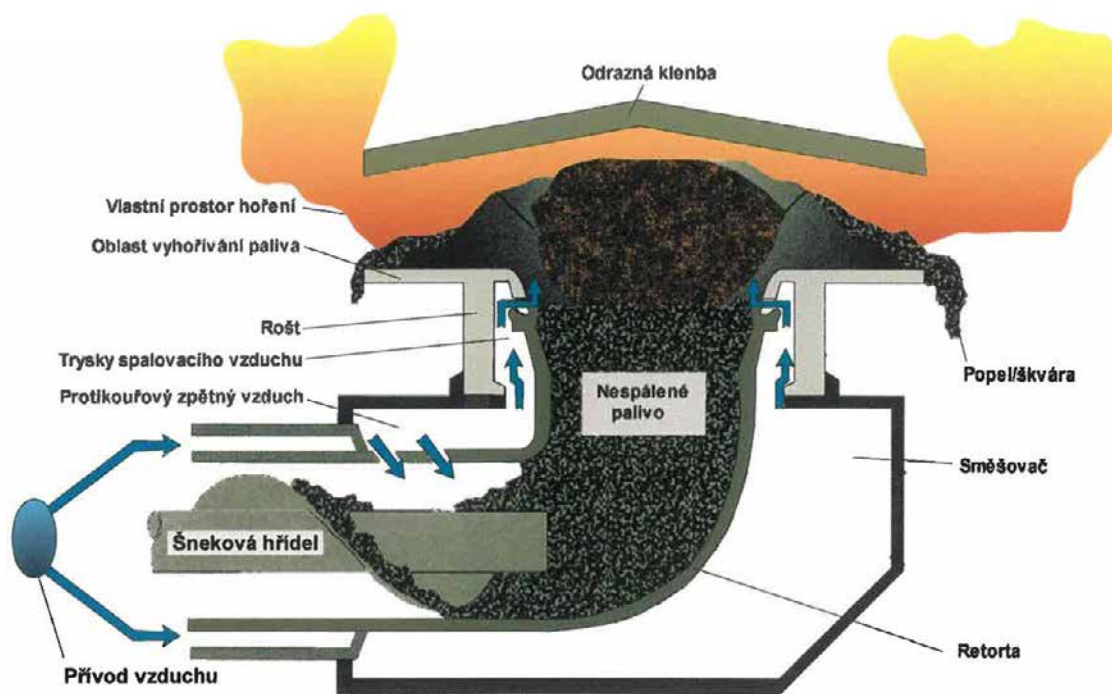
Uvedené časové průběhy všech sledovaných parametrů potvrzují výrazně vyrovnanější průběh. Trvalé kolísání měřených hodnot je dáno způsobem regulace, tzn. častým a periodickým přísouváním čerstvého paliva do retorty. Průměrná měřená hodnota obsahu oxidu uhelnatého ve spalinách za kotlem je menší než 500 ppm, zatímco u prvního příkladu byla maximální koncentrace cca 5 %. Průměrná koncentrace kyslíku odpovídá součiniteli přebytku vzduchu cca 2,1. Je to více, než v předchozím příkladu, je to však dáno odlišnou technologií spalování. Rovněž další uvedené parametry potvrzují závěry o podstatně vyrovnanějším průběhu spalovacího procesu. Podstatné je, že zcela zmizely extrémní provozní stavy. Kolísání rozhodujících provozních parametrů kotle je dáno periodickou dodávkou paliva a jeho míra závisí na délce provozního intervalu a jemu odpovídající prodlevě. Bude se proto zvětšovat s poklesem tepelného výkonu kotle a minimální bude v případě trvalé dodávky paliva. Takový stav je však spíše teoretický, neboť předpokládá konstantní výkon kotle na úrovni jmenovitého výkonu při konstantní kvalitě spalovaného uhlí.

Poznámka autorů: Protože je tento článek určen pro publikaci v časopisu Zpravodaj „Hnědé uhlí“ chceme informovat, že na kotli s tímto ohništěm byla úspěšně provedena také řada spalovacích zkoušek s hnědým uhlím, jak bude uvedeno dále. Nemáme však k dispozici výsledky, umožňující srovnání obou způsobů spalování.

Srovnání obou způsobů spalování, charakterizovaných na obr. 3 a obr. 5, potvrzuje jednoznačné výhody kontinuálního přívodu paliva. Podle uvedených závěrů lze také konstatovat, že čím častěji a v menších dávkách je podáváno palivo do ohniště,



Obr. 3 Charakteristické parametry spalovací zkoušky s jednorázovým přikládáním



Obr. 4 Schéma ohniště s kontinuálním přívodem paliva

tím vyrovnanější bude průběh spalovacího procesu, tím rovnoměrnější bude dodávka tepla a tím nižší budou extrémní hodnoty emisních koncentrací škodlivin, vznikajících jako produkt nedokonalého spalování. Takový způsob spalování je nesrovnatelně přátelštější k životnímu prostředí, než jednorázové spalování velkých dávek. Spalovací princip je vhodně uzpůsoben pro použití regulační techniky, což např. umožňuje regulaci tepelného výkonu pokojovým termostatem, podobně jako u plynových kotlů.

Podobných výsledků bylo dosaženo také při zkouškách kotle s otáčivým roštěm při spalování hnědého uhlí. Jen pro ilustraci je na obr. 6 uveden srovnatelný záznam jedné zkoušky, při které bylo spalováno uhlí o výhřevnosti 17,4 MJ/kg při tepelném výkonu 24 kW.

O tom, že způsob spalování neovlivňuje pouze složení spalín, ale také celkovou účinnost kotle, svědčí orientační průměrné hodnoty účinnosti z velkého počtu prováděných provozních zkoušek:

prohořivací ohniště	$\eta_k = 60 \%$
otáčivý rošt	$\eta_k = 70 \%$
retorta se šnekem	$\eta_k = 74 \%$

Vždy přitom platí, že vyšší účinnost znamená nižší spotřebu paliva a menší množství škodlivin, vypuštěných do ovzduší.

Možnosti odsiřování spalín

Typickou škodlivinou, jejíž emisní koncentrace je dána složením paliva a jejíž tvorbu nelze ovlivnit způsobem spalování, je oxid siřičitý. Vzniká dokonalým vyhořením spalitelné síry, obsažené v palivu. Existuje proto jediný způsob jak snížit produkci oxidu siřičitého při spalování uhlí v malých kotlech: spalovat uhlí s nižším obsahem spalitelné síry. Tato zásada se běžně respektuje a pro spalování v domácích kotelnách se nabízí uhlí s nižším obsahem síry. Jeho zásoby ovšem nejsou neomezené, navíc existuje pochopitelný trvalý zájem o spalování sirnatějších druhů uhlí při použití jednoduché metody odsiřování.

Úspěšný vývoj technologií odsiřování spalín pro kotle velkých výkonů vede k představám, že jim podobný zjednodušený princip bude možné uplatnit i u malých kotlů, byť za cenu nižší účinnosti odsiřování. Z technického hlediska je takové řešení možné, ekonomicky je však mimo veškeré představy. Hledají se proto jednoduchá a levná řešení. Většina osvědčených technologií odsiřování spalín zachycuje vzniklý oxid siřičitý alkalickým sorbentem tak, aby vznikla pevná fáze, kterou lze zachytit na filtrech a deponovat, nebo v lepším případě využít jako surovinu. Protože nejjednodušší, a taky ovšem nejméně účinnou technologií, je suché aditivní odsiřování, ubírají se úvahy tímto směrem. Představa je jednoduchá. Máme-li při spalování sirnatého uhlí odsiřit spaliny, musíme do ohniště přidat navíc vhodné aditivum. Nejdostupnější a nejlevnější je mletý vápenec a nejsnáze ho dopravíme do ohniště když ho smícháme s uhlím.

Jenže tak jednoduché to není a výsledky zkoušek to potvrzují. O výsledné účinnosti odsiřování nerozhoduje pouhá přítomnost aditiva v ohništi. Pro odsiřovací reakci

je nutné vytvořit vhodné podmínky na základě znalosti procesů hoření spalitelné síry paliva a vazby vzniklého oxidu siřičitého na použité aditivum.

Spalování uhlí na pevném roštu se výrazně odlišuje od jiných způsobů spalování, jako je spalování uhelného prášku ve vlnosu, spalování ve fluidní vrstvě apod. Vrstva uhlí je nehybná a jednotlivé fáze probíhají postupně v čase: přehřev, sušení, uvolnění a hoření prchavé hořlaviny (pyrolýza), hoření fixního uhlíku, dohořívání. Spalování síry začíná při pyrolýze, kdy její organicky vázané sloučeniny přecházejí do plynné fáze jako sirovodík, organické sulfidy a síru obsahující heterocyklické organické látky. Tato fáze je typická nedostatkem kyslíku (obr. 2) a v oblasti bezprostředně nad vrstvou uhlí je silně redukční atmosféra s vysokým obsahem oxidu uhelnatého. Za této situace je dooxidace na oxid siřičitý obtížná. Při spalovacích zkouškách byly v této oblasti naměřeny poměrně vysoké koncentrace sirovodíku na úrovni 100 – 150 mg/m³. Teprve po částečném spálení prchavé hořlaviny začíná koncentrace oxidu uhelnatého klesat a objevuje se významnější množství oxidu siřičitého. (Představu o tomto procesu poskytuje obr. 3, který však uvádí emisní koncentrace). V další fázi hoření již silně redukční atmosféra zaniká a zbylá část síry zvolna dohořívá. To vše probíhá v prostoru ohniště nad vrstvou uhlí na roštu, ve které se nachází aditivum. Těžko si lze představit odsiřovací reakci v nehybné vrstvě hořícího uhlí s redukční atmosférou. Odsiřování může probíhat pouze v prostoru ohniště reakcí oxidu siřičitého s částicemi aditiva, vynášenými z vrstvy proudem spalin. Není známo, jaká část aditiva zůstává ve vrstvě a přechází do popela. Jisté je, že se tato část odsiřování nezúčastňuje. Při spalovacích zkouškách na kotli s pevným roštem byly ve fázi s maximální rychlostí hoření ve spalinách za kotlem naměřeny vyšší koncentrace sirovodíku než oxidu siřičitého.

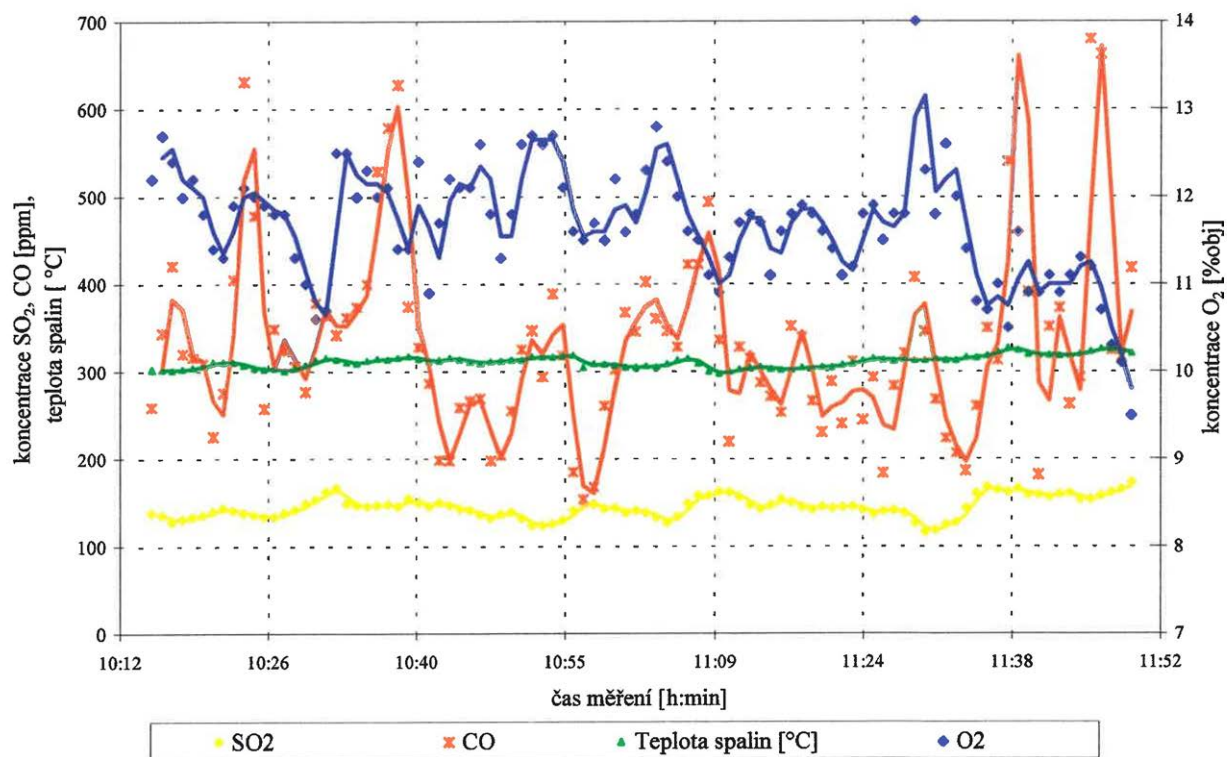
Lepší podmínky pro tento způsob odsiřování poskytují ohniště s kontinuálním přívodem paliva. Systematické spalovací zkoušky, prováděné na kotlech s ohništěm podle obr. 4 a s otáčivým bubnovým roštem, poskytly prokazatelně vyšší účinnost odsiřování. Ta byla stanovena srovnáním emisních koncentrací oxidu siřičitého při spalování čistého a aditivovaného vzorku. Byly získány tyto výsledky:

kotel s bubnovým roštem	účinnost odsíření 16 %
kotel se spalováním v retortě	účinnost odsíření 29 – 48 %.

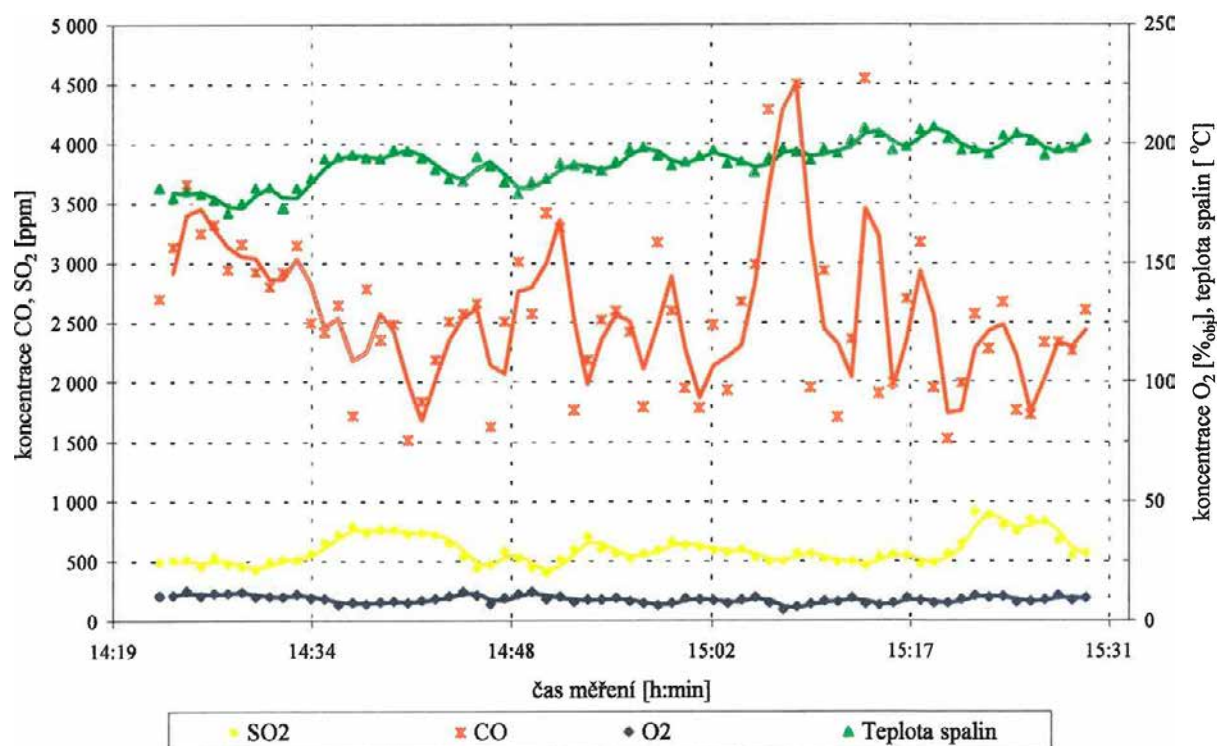
Lepší odsíření ve druhém případě lze vysvětlit vytvořením až 10 cm vysoké vrstvy popela nad hořícím uhlím v retortě. Přítomnost podstatné části aditiva v popelu a trvalý a málo kolísavý spalovací proces s poměrně vysokým přebytkem vzduchu představují vhodné podmínky k dosažení vyšší účinnosti odsíření. Značný rozsah naměřených hodnot souvisí s největší pravděpodobností s chováním a vlastnostmi popelové vrstvy, pokrývající hořící uhlí.

Závěr

Má-li být i nadále zachována možnost používat uhlí k vytápění menších objektů, musí se změnit technologie jeho spalování. Požadavkům 21. století mohou vyhovět pouze kotle s kontinuálním přívodem paliva. Protože spolehlivá doprava paliva do ohniště představuje poměrně náročný technický úkol a také pro zajištění stabilního průběhu spalovacího procesu, bude takový způsob spalování klást zvýšené nároky na kvalitu uhlí, zejména na jeho granulometrii. To pak přirozeně zvýší jeho cenu. Jistou



Obr. 5 Charakteristické parametry spalovací zkoušky s kontinuálním přívodem paliva (systém CRE)



Obr. 6 Charakteristické parametry spalovací zkoušky na kotli s otáčivým roštem

kompenzací může být vyšší účinnost kotle a s tím spojená nižší spotřeba paliva a také vyšší uživatelský komfort. V každém případě náklady na vytápění vzrostou. Bude dražší kotel i palivo. Jiné řešení neexistuje, protože druhou alternativou je postupný zánik malých uhelných kotlů. Dosud užívané a mnoho desetiletí známé způsoby spalování do současné doby nepatří a budou vzbuzovat rostoucí odpor díky nadměrnému znečišťování ovzduší škodlivinami vznikajícími při spalování.

Zájem o snižování emisních koncentrací oxidů síry, které jsou při spalování uhlí vždy ve spalinách obsaženy, vedl ke snaze spalovat v malých kotlech nízkosíraté druhy. Takový zájem bude trvalý, na druhé straně lze v budoucnu očekávat snahu spalovat i uhlí s vyšším obsahem spalitelné síry a používat vhodnou odsiřovací metodu. U kotlů s tradičním způsobem spalování v prohořivacím ohništi přijatelně účinná a jednoduchá metoda odsiřování spalin neexistuje. Moderní systémy spalování mohou vytvořit podstatně lepší podmínky pro vazbu vzniklého oxidu siřičitého na aditivum, přiváděné do kolte současně s palivem a dosti výrazně snížit emisní koncentrace oxidu siřičitého.

Principiální otázka, kterou si je třeba v této souvislosti položit, zní: Patří uhlí do malých kotlů? Odpověď je pak: Ano, ale ne do těch dnes běžně užívaných.