

Modelování procesu samovzněcování uhlí na uhelných skládkách

prof. Ing. Boleslav Taraba, CSc.¹, Ing. Vlastimil Moni, Ph.D.²

¹Přírodovědecká fakulta, Ostravská univerzita

²Výzkumný ústav pro hnědé uhlí a.s., Most, moni@vuhu.cz

Přijato: 11. 4. 2012, recenzováno: 18. 5. a 14. 6. 2012

Abstrakt

Příspěvek shrnuje základní poznatky z rešeršních šetření v problematice modelování procesu samovzněcování uhlí provedených v rámci řešení projektu z programu ALFA č. TA01020351 „Výzkum možností predikce vzniku záparů a následného samovznícení hnědouhelných paliv“. Pozornost se soustředí především na poznání zákonitostí tohoto procesu přímo v podmínkách uhelných skládek in situ.

Simulation of spontaneous combustion of coal in coal stockpiles

The paper presents a review of basic findings on the simulation of spontaneous combustion of coal. The review was made within the research project No. TA01020351 „Research of possible approaches to predicting centres of spontaneous combustion of coal in brown coal heaps“, funded by the ALFA Programme. The in-situ research focuses on the spontaneous combustion process and its behaviour in coal stockpiles.

Simulation des Prozesses der Selbstentzündung von Kohle auf den Kohlehaldden

Der Beitrag fasst grundlegende Erkenntnisse aus dem Recherchieren der Frage Prozesssimulation der Kohle selbstentzündung zusammen. Diese Untersuchungen wurden im Rahmen der Projektlösung aus dem Programm ALFA Nr. TA01020351 „Forschung von Prädiktionsmöglichkeiten der Entstehung von Selbstentzündungen der Braunkohlenbrennstoffe“ durchgeführt. Die Aufmerksamkeit konzentriert sich vor allem auf die Erkenntnis von Gesetzmäßigkeiten dieses Prozesses direkt unter Bedingungen der Kohlelagerplätze in situ.

Klíčová slova: hnědé uhlí, samovzněcování uhlí, skládky uhlí, modelování.

Keywords: brown coal, spontaneous combustion of coal, coal stockpile, simulation.

1 Úvod

V průběhu roku 2011, úvodního roku řešení projektu TA ČR č. TA01020351 „Výzkum možností predikce vzniku záparů a následného samovznícení hnědouhelných paliv“, byla zpracována studie literárních pramenů o samovzněcování uhelné hmoty [1], která se soustředila na tři základní okruhy otázek:

- 1) indikace počátku procesu samovzněcování uhlí,
- 2) hodnocení nebezpečí vzniku procesu samovznícení uhlí,
- 3) modelování procesu samovzněcování uhlí na uhelných skládkách.

Tyto otázky jsou v souvislosti se zaměřením předmětného projektu zásadní a v dalším průběhu řešení jim bude věnována prioritní pozornost. Informace získané při šetřeních stavu poznání v uvedených aspektech problematiky samovzněcování uhlí pokládáme za zajímavé nejen pro zainteresované pracovníky, ale i pro širší odbornou veřejnost. Té je určen i předkládaný příspěvek, který stručně prezentuje stěžejní poznatky z realizované studie v otázce modelování procesu samovzněcování uhlí na uhelných skládkách, jakožto prostředku k poznávání zákonitostí samovzněcování uhlí v podmínkách in situ.

2 Modelování procesu samovzněcování uhlí

Z principiálního hlediska můžeme modelování rozdělit na fyzikální a matematické (numerické). První způsob se z důvodu evidentní náročnosti (experimentální i finanční) postupně opouští a je nahrazován modelováním numerickým, které především v posledních letech nabývá na významu i oblibě.

2.1 Fyzikální modelování záparu na uhelných deponiích

Do kategorie fyzikálního modelování se dají zřejmě zařadit všechny práce experimentálního charakteru, které „modelují“ vliv (vybraných) faktorů na proces oxidace uhlí a následně jej analyzují s ohledem na chování soustavy v podmínkách in situ. Právě tento přenos výsledků z laboratorních podmínek do reálných podmínek in situ s sebou nese řadu nejasností, které se mohou projevit v zavádějících dedukcích i závěrech. To je důvodem, proč jsou ceněna především experimentální šetření na modelech, jež se svou geometrií (velikostí) blíží reálné skládce.

V rámci České republiky bylo s fyzikálním modelováním samovznícení uhelné skládky experimentováno již koncem sedesátých let minulého století na Hornickém ústavu ČSAV v Praze, kde byla vytvořena modelová halda o objemu cca 2 m³ [2]. Skládka byla vybavena hnědým uhlím, které bylo předtím sušeno, což ale právě u hnědého uhlí může vyvolat zásadní změnu v jeho chování vůči kyslíku oproti reálným podmínkám. Později provedl poměrně široká experimentální monitorování Dušák [3], který k tomuto účelu využil reálných skládek hnědého uhlí. Jím sledované skládky sice nelze pokládat za modelové (chybí informace o jakosti uhlí, zrnitosti uhlí, geometrii či zhutnění skládky, ...), podařilo se mu ale prokázat základní zákonitosti záparového procesu na uhelných deponiích, nezávisle potvrzené i dalšími autory.

Obdobným směrem se fyzikální modelování této problematiky ubíralo i v zahraničí – od pokusných deponií „poloprodučního“ charakteru [4-6] až po skládky reálných, „provazních“ rozměrů [7,8]. Za pozornost zde stojí především úsilí špa-



Obr. 1: Příprava měřicí sondy pro monitorování pokusné skládky hnědého uhlí (ilustrační foto).

nělských výzkumníků [8], kteří připravili 4 skládky s hmotností uhlí od 2 400 do 7 500 tun. Při jejich přípravě použili různý stupeň zhutnění, čímž vytvořili skládky s pórozitami 30, 17, 15, resp. 10 %. Experimentální výsledky z monitorování teplot, plyných složek i změn v jakosti uhlí poté zužitkovali při tvorbě a verifikaci matematického modelu [9].

2.2 Numerické modelování záparu na uhelných deponiích

Počátky numerického modelování hoření uhlí se datují do první poloviny minulého století [10], přičemž úměrně vývoji počítačové techniky nabíral tento přístup na významu. Dnes je matematických simulací záparů na skládkách uhlí publikována celá řada [9,11-16]. Všechny modely se přitom během jejich vývoje musely „nějak vypořádat“ s exaktním postihnutím následujících položek:

- homogenita (heterogenita) skládkového prostředí a geometrie skládky,
- transport a fázové přeměny hmoty (tj. přívod kyslíku, odvod reakčních zplodin, kondenzace a vypařování vody, ...),
- transport, resp. distribuce tepla (akumulovaný, odvedený či disipovaný podíl tepla),
- chemismus záparového procesu (teplotní a časová závislost oxidační rychlosti, vliv zrnitosti, vliv vlhkosti, rychlost a teplotní dynamika vývinu plyných složek, ...).

Podle náročnosti (minimálně výpočetního času) lze vyvinuté modely rozdělit na jednorozměrné-1D [9,11-13], dvourozměrné-2D [15,16] či třírozměrné-3D [17].



Obr. 2: Monitorování experimentálních údajů ze sondy na pokusné skládce hnědého uhlí (ilustrační foto).

V současnosti zřejmě nejprogresivnější varianty modelů se opírají o softwarové prostředí FLUENT (CFD modelování) a umožňují simulovat velmi složité dynamické situace ve trojrozměrném prostoru. Například při řešení záparu v závalovém prostoru stěnových porubů se podařilo namodelovat rozvoj záparového procesu při postupu porubní stěny od výchozí prorážky až po dosažení cílové směrné délky [18]. Při modelování záparu na uhelných skládkách se zase pomocí CFD podařilo zohlednit reálné změny rychlosti větru a jeho směru na rozvoj záparového procesu [19].

3 Shrnutí základních poznatků

Základní poznatky o chování záparového procesu uhlí na skládkách, na kterých se různí autoři (bez ohledu na typ použitého modelu) vesměs shodují, lze shrnout následovně:

- Ohnisko záparu vzniká primárně pod povrchem skládky (cca 0,5 – 3 m) [3,15] a výhradně na její návětrné straně [14].
- V průběhu rozvoje záparového procesu toto ohnisko „putuje“ - obvykle směrem k přicházejícímu kyslíku [3,14,15].
- Rychlost průtoku vzdušnin skrze skládku významným způsobem ovlivňuje přirozená konvekce, hovoří se o tzv. komínovém efektu [12].

Rozhodujícími parametry skládky, které mají vliv na vznik a průběh záparu, jsou:

- a) stupeň zhutnění (mezerovitost, pórozita) skládky – čím je mezerovitost větší, tím více se snižuje odpor proti pronikání vzduchu dovnitř skládky a zvyšuje se tak nebezpečí vzniku záparu [14-16]. Akgun s Essenhighem [15] takto zjistili, že kritickou hodnotou porovitosti skládky je z tohoto pohledu 30 %, kdy je nebezpečí vzniku samovznícení maximální,
- b) úhel svahování (sklonu) stěn skládky – čím je úhel ostřejší, tím je menší riziko záparu. Autoři uvádějí jako „kritický“ úhel pro vznik záparu 15° [3], 18° [14], respektive 26° [15],
- c) výška skládky – pro vznik záparového procesu musí být překročena „jistá“ minimální výška skládky. Za takovouto „minimální“ výšku je označována hodnota 2 m [15].

Rozhodujícími parametry uhlí, které ovlivňují vznik a průběh záparu na dané skládce pak jsou:

- a) oxireaktivita uhlí (predispozice uhlí k samovznícení) – čím je větší, tím vzrůstá i nebezpečí vzniku záparu [10,14],
- b) zrnitost uhlí – obecně je přijato, že čím je uhlí jemnější, tím nebezpečí vzniku samovznícení na skládce roste. Někteří autoři ale prokázali, že to platí pouze do jisté, tzv. kritické, zrnitosti [10,13,14],
- c) obsah vlhkosti skladovaného uhlí – v této otázce panuje souhlas pouze do té míry, že vlhkost může průběh záparového procesu zásadním způsobem ovlivnit [10,11,17].

Originální náhled na otázku stability skládky přinášejí Brooks a Glasser [12], kteří z pohledu záparového procesu rozlišují dva základní typy stabilních skládek:

- 1) skládka limitovaná přístupem kyslíku – kdy veškerý kyslík zreaguje na povrchu uhelné skládky nebo těsně pod ním, takže uvolněné teplo se může snadno odvést do okolí: Takový případ nastává u kombinace velmi reaktivního (jemného) uhlí a silně zhutněné skládky;
- 2) skládka limitovaná rychlostí chemické reakce kyslíku s uhlím – kdy je kyslík přítomen v celém objemu skládky, ale jeho reakce s uhlím probíhá tak pomalu, že se uvolněné teplo nestačí akumulovat: Takový případ nastává pro málo reaktivní (kusové) uhlí a nezhutněnou skládku.

4 Závěr

Na základě analýzy výsledků z provozních dlouhodobých měření uhelných těles dojde ke korekci modelu měření a k určení vlivu klimatických podmínek, vlivu degradace fyzikálně-chemických faktorů a vlivu dalších poruchových faktorů na procesy samovznícení uhlí. V oblasti plynometrie budou stanoveny principy odhadu teploty ohniska samovznícení na základě rozborů provozních odběrů desorbovaných plynů s využitím laboratorně ověřených plynových obrazů indikačních plynů samovznícení. Výsledkem bude časový popis vývoje teplotního pole, příslušejícího ohnisku záparu. Výpočty se budou provádět podle optimální potřeby analytickými nebo numerickými metodami s využitím dostupných programů pro řešení parciálních diferenciálních rovnic a zejména aparátů statistických metod.

Spojení statisticko-matematického popisu teplotního pole s fyzikálně-chemickou analýzou k vytvoření zjednodušeného modelu ohniska záparu za účelem sledování vlivu konvektivní difúze kyslíku k ohnisku, atmosférických vlivů atd. Cílem tohoto teoretického postupu bude fabrikace podkladů k predikci vzniku a vývoje záparových reakcí, které se ve svém důsledku prezentují jako dynamické tepelné zdroje. Podkladem budou fyzikálně-chemické parametry, získané experimentálně, zahrnující rovněž poznatky z oblasti kritické teploty samovznícení uhlí a dynamiky samovznícení uhlí.

Poděkování

Tento článek byl vypracován v rámci programu ALFA projektu č. TA01020351 za finanční podpory z prostředků státního rozpočtu prostřednictvím TA ČR.

Literatura

- [1] MONI, V. a kol.: *Výzkum možností predikce vzniku záparů a následného samovznícení hnědouhelných paliv*. Rešeršní studie dosavadních poznatků a zkušeností. VÚHU a.s., Most, 2011.
- [2] ČERNÝ, V., LANKOVÁ, S., KLÁN, J.: *Vliv vnějších podmínek na vznícení a hoření sušeného uhlí*. Výzkumná zpráva. HOÚ ČSAV Praha, 1969.
- [3] DUŠÁK, V.: *Měření teplot a šíření záparů v hromadách prachového hnědého uhlí*. Sborník konference Samovolné vznícování uhlí v teorii a praxi, Smilovice 17.5.1989, ÚGG ČSAV.
- [4] BEAMISH, B.B., LAU, A.G., MOODIE, A.L., VALLANCE, T.A.: *Assessing the self-heating behaviour*

- of Callide coal using a 2-meter column*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 15, s. 385-390, 2002.
- [5] YOUNG, B.D., WILLIAMS, D.F, BRYSON, A.W.: *Two-dimensional Natural-Convection and Conduction in a Packed-Bed Containing a Hot-spot and Its Relevance to the Transport of Air in a Coal Dump*. International Journal of Heat and Mass Transfer 29, s. 331-336, 1986.
- [6] CLARKSON, F.: *Results of self-heating tests of Australian coals conducted in a 16 m³ reactor*. Proceedings of the 6th Australasian Coal Operators Conference, APR 26-28, 2005 Brisbane, Australia, Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series, s. 201-208.
- [7] OZDENIZ, H.: *Statistical Modeling of Spontaneous Combustion in Industrial-Scale Coal Stockpiles*. Energy Sources Part A-Recovery Utilization and Environmental Effects 31, s. 1368-1375, 2009.
- [8] MIRANDA, J.L., ROMERO, C., IBARRA, J.V., SCHMAL, D., MARTINEZ, D.: *Weathering of stockpiled coals and the resulting losses of calorific value*. Journal of Coal Quality 13, s. 104-112, 1994.
- [9] FIERRO, V., MIRANDA, J.L., ROMERO, C., ANDRÉS, J.M., ARRIAGA, A., SCHMAL, D.: *Model predictions and experimental results on self-heating prevention of stockpiled coals*. Fuel 80, s. 125-134, 2001.
- [10] CARRAS, J.N., YOUNG B.C.: *Self-heating of coal and related materials: Models, application and test methods*. Progress in Energy and Combustion Science 20. s. 1-15, 1994.
- [11] SCHMAL, D., DUYZER, J.H., VAN HEUVEN, J.W.: *A model for the spontaneous heating of coal*. Fuel 64, s. 963-972, 1985.
- [12] BROOKS, K., GLASSER, D.: *Modelling the spontaneous combustion of coal*. South African Journal of Science 84, s. 874-875, 1988.
- [13] AKGUN, F., ARISOY, A.: *Effect of particle size on the spontaneous heating of a coal stockpile*. Combustion and Flame 99, s. 137-146, 1994.
- [14] KRISHNASWAMY, S., AGARWAL, P.K., GUNN, R.D.: *Low-temperature oxidation of coal. 3. Modeling spontaneous combustion in coal stockpiles*. Fuel 75, s. 353-62, 1996.
- [15] AGKUN, A., ESSENHIGH, R.H.: *Self-ignition characteristics of coal stockpiles: theoretical prediction from two-dimensional unsteady-state model*. Fuel 80, s. 409-415, 2001.
- [16] KRAJČIOVÁ, M., JELEMENSKÝ, L., KIŠA, M., MARKOŠ, J.: *Model predictions on self-heating and prevention of stockpiled coals*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 17, s. 205-216, 2004.
- [17] YUAN, L., SMITH, A.C.: *CFD modeling of spontaneous heating in a large-scale coal chamber*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 22, s. 426-433, 2009.
- [18] TARABA, B., MICHALEC, Z.: *Effect of longwall face advance rate on spontaneous heating process in the gob area – CFD modelling*. Fuel 90, s. 2790-2797, 2011.
- [19] BOJKO, M., KOZUBKOVÁ, M., MICHALEC, Z., KOZUBEK, E.: *Mathematical model of the low-temperature oxidation of coal in coal stockpiles and dumps*. XVV. Medzinárodná vedecká konferencia "Aplikácia experimentálnych a numerických metód v mechanike tekutín a energetike", Žilina, 28.4 – 30.4. 2010, s. 23-29, ISBN 978-80-554-0189-8.