

Využití matematicko-fyzikálních metod při likvidaci tepelně aktivních odvalů se zvýšenou radioaktivitou

P. Kubíček, J. Drápala: Application of Mathematical-Physical Methods for Liquidation of Thermal Active Dumps with Raised Radioactivity. Život. Prostr., Vol. 34, No. 1, 38–41, 2000.

The article presents application of mathematical-physical methods for optimisation of maintenance work and/or liquidation of dumps with gob fire. The following problems are discussed: diagnostics of the dump thermal fields, theoretical prognosis of natural cooling of the dump surface by the atmosphere at its interface, problems related to the work security when cooling with water, methods of measuring the temperature and thermal conductivity on the site and problems in relation with the dump raised radioactivity. The diagnostics of the dump temperature field is treated in more details. On the basis of mathematical-physical equations it is possible to determine estimates of about 15 basic parameters characterising the gob fire temperature and thermal field focal point from the temperature measurement data near the surface in short intervals. The procedure mentioned above is original and the reached theoretical results are utilised as the basic data for optimisation the maintenance technical procedures aiming to minimise the negative impact of the dumps on the environment.

Odvaly se záparem, tj. haldy, které uvnitř "hoří" a materiál těchto odvalů vykazující navíc v různé míře zvýšenou přirozenou radioaktivitu, představují pro své okolí fenomén, který může postupem času značně ohrozit životní prostředí. V případě, že ohnisko záparu "prohoří" směrem k povrchu, dojde ke zvýšení požární aktivity a produkce škodlivých exhalací. Oxidační zplodiny, které vznikají prohoříváním odvalů, mohou velice negativně ovlivnit nejen blízké okolí, ale podle povětrnostních podmínek působit v různých směrech do značných vzdáleností. U těchto starých zátěží životního prostředí je nutno na základě podrobného průzkumu situace přistoupit v řadě případů k velice nákladné sanaci nebo likvidaci hald.

Problematika optimalizace volby a postupu sanačních prací není dosud plně propracována vzhledem k velké složitosti problémů a specifčnosti lokalit. Vedle technických problémů jsou zde hlediska ekologická, ekonomická, problémy spojené s bezpečností práce při vlastní sanaci a rizika, která vyplývají z této činnosti pro okolí. Je nutno si uvědomit, že množství tepla v těchto deponiích, kde ložiska záparu jsou aktivní několik desí-

tek let, představují hodnoty v desítkách nebo stovkách TJ a teploty v ohniscích záparů mohou být vyšší než 500 °C, případně 1000 °C. Navíc k tomu přistupuje zvýšená radioaktivita materiálu, který proti "normální" měrné aktivitě hornin do 100, resp. 300 Bq.kg⁻¹, může vykazovat aktivity více než desetkrát vyšší. Situaci pak dále komplikuje únik plynného radonu s radioaktivitou. Při sanaci je nutno odval ochlazovat vodou. Nepřiměřené ochlazování může vést nejen k vzniku rozsáhlého oblaku sytých vodních par, resp. brýdových par, ale také k transportu radioaktivity do povrchových nebo spodních vod. Aplikace vody na povrchu odvalu nebo při injektážích představuje značné riziko z hlediska bezpečnosti práce. Při průsaku vody do pórů nebo dutin v horkých částech odvalu mohou nastat exploze, které mohou v některých případech připomínat časované nálože. Zde je nutno si uvědomit, že spotřeba vody při ochlazování odvalu je značná a pohybuje se podle velikosti a počtu ohnisek záparu v řádech 10⁴ až 10⁵ m³.

Je tedy zřejmé, že pro kvalifikovanou likvidaci odvalů se záparem a se zvýšenou radioaktivitou je nutno znát celou řadu fyzikálních i chemických parametrů odvalu,

zejména fyzikálních veličin, které se týkají popisu teplotního pole. Z těchto znalostí pak vyplývá i prognóza a volba optimálních postupů při ochlazovacích pracích a následném rozhrnování odvalu. K získání těchto poznatků je nezbytně nutná matematicko-fyzikální analýza celého komplexu problémů, které se týkají teplotního pole v odvalu a prognóza jeho změn při ochlazovacích pracích a při postupném rozhrnování deponie.

Praktické zkušenosti s řešením této problematiky jsou známy i ze zahraničí, zejména z Ruska a Polska (např. Sarančuk, 1997; Taťjančenko, Pisejev, 1994; Tabor, 1995; Sznajder a kol., 1992 atd.), ale větší část jich nelze vždy přímo aplikovat v našich podmínkách. Americká literatura z posledních let (např. Edwards, 1990 a práce v ní citované) se zabývá spíše teoretickými problémy vzniku a průběhem záparu. Modely a matematické programy, resp. programové moduly, které jsou k dispozici na trhu (např. Landa, 1998), neuvádějí komplexnější řešení teplotního pole ohnisek záparu, které obsahuje větší počet neznámých parametrů a které by bylo možné přímo použít pro zpracování dat z terénních měření. Tato terénní měření představují hodnoty povrchových teplot na odvalu. Lze využít i leteckých termických měření a měření teplot ve vrtech. Vzhledem k výšce odvalu nad úroveň okolního terénu jsou nutné vrty i do hloubek větších než 40–50 m. Měření teplot se většinou provádí ve vzduchovém sloupci ve vrtu, pouze teplota na dně vrtu je změřena kontaktně. Naměřené teploty ve vzduchovém sloupci ve vrtu se však mohou značně lišit od skutečné teploty zeminy v určité hloubce. Pomocí vrtů lze získat vzorky pro stanovení radioaktivity a chemické analýzy. Náklady na tuto průzkumnou etapu s ohledem na počet a hloubku vrtů mohou být dosti vysoké.

Návrh postupu sanačních prací

Z uvedených důvodů se jevil autorům vhodný postup, který je založen na souboru fyzikálně-matematických modelů, které s velkou pravděpodobností mohou odrážet alespoň zjednodušeně situaci v odvalu a pomocí teorie řešení rovnic matematické fyziky stanovit odhad základních parametrů ohnisek záparu a teplotního pole a na základě takto získaných údajů předpovědět možné ochlazování povrchových vrstev při rozhrnování. Tyto údaje zase povedou k hledání optimálního postupu sanace jak z hlediska ekonomického, tak i z ekologického, zvláště v případech, kdy odval vykazuje zvýšenou radioaktivitu.

Teoretické řešení celé problematiky, které vychází z vlastních terénních měření v povrchových a podpovrchových vrstvách odvalů, je možno rozdělit do několika etap:

- **Diagnostika teplotního pole odvalu**, která vychází

z mapování terénu, tj. z měření teplot na povrchu a v krátkých vrtech a na základě toho umožní výpočet základních teplotních a tepelných koeficientů vodivosti ohnisek včetně optimalizace postupu při měření teplot, provádění zkušebních vrtů a získávání hodnot dalších fyzikálních veličin.

- **Teoretický výpočet přirozeného ochlazování povrchových vrstev odvalu** (ovzduším) při jeho postupném rozhrnování s cílem stanovit odhad časových intervalů pro vytvoření optimálního harmonogramu těchto prací. Na základě získaných údajů lze kvalifikovaněji posoudit účinnost a vhodnost umělého ochlazování odvalu, např. vodou, k urychlení postupu sanačních prací.

- **Exaktní matematické posouzení rizika** z hlediska bezpečnosti práce při umělém ochlazování odvalu v důsledku možného proniknutí kapaliny do hlouběji uložených dutin v odvalu. Následkem ohřátí a varu v kavernách může dojít k haváriím, které jsou obdobou výbuchů časovaných náloží a dosud nebylo možné stanovit alespoň přibližně časový průběh ohřevu kapaliny v kaverně, maximální tlak páry, zpoždění, která jsou s tímto explozem spojena, atd.

- **Řešení problémů spojených se zvýšenou radioaktivitou odvalu** má těsnou souvislost s průběhem sanačních prací a vystupuje znovu do popředí např. v případech, kdy nadměrné použití vody při umělém ochlazování odvalu znamená riziko zvýšení radioaktivity povrchových a podzemních vod. Při rozhrnování je nutno uložit odlišným způsobem materiál, který vykazuje zvýšenou měrnou aktivitu. Za tímto účelem se ověřuje jednoduchá srovnávací radiometrická metoda, která umožní velice rychle určit a rozlišit vrstvy materiálu o měrné aktivitě větší než 1–1,5 kBq.kg⁻¹. Využití této metody umožní operativní řízení rozhrnovacích prací z hlediska přirozené radioaktivity.

Na základě získaných podkladů je nutno provést syntézu výsledků, jejich vyhodnocení a pak zdokonalit a upřesnit jak postupy při měření fyzikálních parametrů v terénu, tak i řešení některých dílčích teoretických, zejména matematických úloh. Tyto práce je však nutno provádět postupně, hlavně na základě zkušeností získaných v terénu. Cílem pak bude pokus o optimalizaci harmonogramu měřicí etapy, hlavně s ohledem na snižování počtu podpovrchových průzkumných vrtů a návrhy na postup ochlazovacích prací společně s rozhrnováním odvalu tak, aby tyto práce byly ekologicky a ekonomicky co nejvýhodnější. Jako zásadní zde bude figurovat otázka, zda je výhodnější využít přirozeného ochlazování odvalu ovzduším po jednotlivých skrývkách a přiměřeně urychlit tento proces ochlazováním vodou, což je záležitost dlouhodobější a méně nákladná, nebo aplikovat převážně ochlazování vodou. Použití výhradně druhé cesty by bylo zřejmě spojeno nejen s vyššími finančními ná-

klady, ale i s podstatně větším rizikem s ohledem na bezpečnost práce a životní prostředí.

Vzhledem k tomu, že teoretické řešení těchto problémů probíhá pouze krátkou dobu a při omezených prostředcích, jsou dosud jen částečně rozpracovány jenom první dvě etapy.

Diagnostika teplotního pole odvalu se záparem

Základem pro vypracování diagnostiky teplotního pole odvalu jsou fyzikálně-matematické modely tvaru ohnisek záparu, které budou charakterizovány různým rozložením hustoty tepelných zřídél. Tyto modely musí s velkou pravděpodobností odpovídat charakteru ohnisek v odvalových deponiích a pro další analýzu je vhodné, aby odrážely určité mezní případy. Na druhé straně je nutno tyto modely volit tak, aby jejich matematický popis, a zejména výpočet příslušných integrálů, byl poměrně jednoduchý a výsledné teoretické vztahy nebyly příliš komplikované, což umožní jejich praktické použití. Přesto, že celý popis je zaměřen na přibližné analytické řešení uvedené problematiky, bude nutné některé finální matematické vztahy vyhodnotit numericky.

Při diagnostice teplotního pole odvalu se vycházelo z předpokladu, že toto pole je kvazistacionární, tzn. že po dobu určité etapy prací na odvalu je možno přibližně považovat za ustálené, tj. stacionární, a odtud vyplývá i použití příslušného matematického aparátu.

Modely ohnisek záparu jsou charakterizovány rozložením hustoty tepelných zřídél v ohnisku. Hustota tepelných zřídél je u jednoho typu ohnisek popsána Gaussovou funkcí a tato ohniska mohou být sféricky symetrická nebo ve tvaru disku či elipsoidu. Protipólem jsou ohniska ve tvaru válce, uvnitř kterého je konstantní hustota tepelných zřídél a podle poměru výšky válce k jeho poloměru mohou aproximovat tvar disku nebo elipsoidu.

Matematické řešení

Problematika teplotního pole spadá do oblasti matematické fyziky. Popis stacionárního teplotního pole je předmětem řešení parciálních diferenciálních rovnic eliptického typu. Pro nás má zásadní důležitost rovnice Poissonova, která zahrnuje vliv tepelných zřídél a rovnice Laplaceova, popisující rozložení teplot mimo oblast těchto zřídél. K výpočtu teplotního pole $T_{(x,y,z)}$ bylo nutno použít obou rovnic. Poissonova a Laplaceova rovnice mají tvar

$$\Delta T_{(x,y,z)} = -\frac{q_{(x,y,z)}}{\lambda} \quad \Delta T_{(x,y,z)} = 0$$

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

kde $T_{(x,y,z)}$ je teplota odvalu, $q_{(x,y,z)}$ je hustota tepelných zřídél a λ je koeficient tepelné vodivosti a Δ je Laplaceuv operátor. V případě odvalu je nutno pro Laplaceovu rovnici uvažovat třetí okrajovou podmínku, která charakterizuje ochlazování povrchu odvalu ovzduším. Poissonova rovnice se řeší pomocí objemových potenciálů, Laplaceova rovnice pomocí zřídlové funkce pro polo-prostor (Tichonov, Samarskij, 1955). Výsledkem řešení je přibližný výpočet funkce $T_{(x,y,z)}$, tj. teplotního pole v odvalu, které přísluší danému ohnisku. Pomocí této funkce lze pak určit základní teplotní a tepelné charakteristiky dané lokality odvalu.

Základem pro diagnostiku teplotního pole odvalu je matematický popis sféricky symetrického ohniska, tj. ohniska ve tvaru soustředných koulí s Gaussovým rozložením hustoty tepelných zřídél a následné teoretické řešení teplotního pole, které považujeme za stacionární.

Výchozími údaji pro tuto matematickou analýzu jsou hodnoty teplot na povrchu a v hloubkách 0,5; 1; 1,5; 2; 3; resp. 4 m v podpovrchových vrtech o průměru ca 30 mm, do kterých lze zapustit termočlánek a změřit kontaktně, po ustálení, teploty zeminy v jednotlivých hloubkách. Měření teplot musí být přesné a nelze ho provádět ve vzduchovém sloupci ve vrtu, protože takto změřený teplotní profil neodpovídá skutečné teplotě zeminy. Měření se provádí v místech, kde jsou nejvyšší povrchové teploty a jeden takový soubor představuje 7–10 krátkých vrtů. Po vyhodnocení naměřených dat se rozhodne o tom, zdali je nutno provést 1–3 dodatečně hlubší vrty, např. do hloubky 5–8 m. Tento postup budeme nazývat mapováním teplotního pole u povrchu odvalu a eliminuje požadavky na nákladné hluboké vrty o průměrech ca 80–100 mm do hloubek 15–50 m. Uvedeným způsobem je možno snížit náklady na tuto etapu o 40–60 %.

Teoretická analýza, která je dosud ve stadiu rozpracovanosti pro sféricky symetrické ohnisko záparu, umožňuje na základě údajů z terénních měření teplot u povrchu odvalu stanovit kvalifikované odhady asi 15 parametrů teplotního a tepelného pole, které přísluší danému ohnisku. Uvedeme pouze veličiny, které si lze snadno představit. Jsou to maximální teplota T_{\max} a hloubka L_1 pod povrchem, která přísluší této teplotě, tepelný výkon ohniska P , poloměr koule R_0 , ve které je soustředěno 75 % tepelného výkonu ohniska, celkové množství kumulovaného tepla Q v odvalu nad úrovní okolního terénu, které ohnisko vyprodukovalo, minimální dobu, po kterou je ohnisko aktivní, hmotnost G_u referenčního paliva (černého uhlí o popelnatosti 10 %), které vyhořelo, uvolněný objem V_0 po vyhoření ve formě pórů a dutin a konečně množství tepla Q_p , o které je

nutno příslušnou část odvalu ochladit, aby mohlo probíhat rozhrnování deponie. Součástí řešení je i graf teplotního profilu v ose, která prochází středem ohniska směrem od povrchu k základně odvalu.

Pomocí této diagnostiky již byly vyhodnoceny údaje z prvních terénních měření teplot na odvalu u Rakovníka v krátkých podpovrchových vrtech v oblastech, kde se nacházely starší hlubší vrty. Porovnáním vypočtených hodnot T_{max} , L_1 s údaji v těchto hlubokých vrtech bylo možno posoudit přesnost diagnostiky a při prvních ověřovacích zkouškách byl nalezen dobrý souhlas mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami.

Teoretické řešení přirozeného ochlazování odvalu při jeho rozhrnování je problematika nestacionárního teplotního pole, jehož řešení je obvykle složitější než řešení stacionárních úloh. Výsledkem dosavadní práce, která není zdaleka ukončena, bylo odvození několika desítek matematických vztahů a postupů, naprogramování řady algoritmů a získávání prvních zkušeností s aplikací teorie v podmínkách praxe na základě terénních měření.

Základním úkolem pro následující etapy je nejen pokračovat v teoretických a matematických pracích, ale i získávat další zkušenosti a propracovat metodiku mapování terénu (tj. hlavně měření teplot) a pomocí těchto parametrů rozšiřovat, upřesňovat a prohlubovat probíhající teoretické práce, což umožní optimalizovat technické postupy při sanaci. Výsledky této optimalizace pak přispívají ke snížení nákladů na průzkumnou etapu a na ochlazovací práce, sníží ekologická rizika a zvýší bezpečnost práce při sanaci.

Literatura

- Edwards, J. C., 1990: Mathematical Modelling of Spontaneous Heating of a Coal. Bed. R. I. 9296, US Bureau of Mines, p. 1–12.
- Landa, I., 1998: Modely pro projektování průzkumných monitorovacích a sanačních prací. Odpady, 2, p. 11–12.
- Sarančuk, V. I., 1997: Borba s gorenijem povodnych otvalov. Naukovaja dumka, Kijev, 167 pp.
- Sznajder, W. a kol., 1992: Likwidacja ogniska pozarowego na zwalowisku szluskowym kopalni "Rymez" v ramach akcji pozarowej. Wiadomosci Górnicze, 5, p. 117–119.
- Tabor, A., 1995: Skladowanie odpadów powęglowych jako problem techniczny i ekologiczny. Wiadomosci Górnicze, 6, p. 259–265.
- Tafjančenko, G. M., Pisejev, N. A., 1994: Novaja tehnologija tušenija gorjačich otvalov. Ugol, 6, p. 13–14.
- Tichonov, A. V., Samarskij, A. A., 1955: Rovnice matematické fyziky. Nakl. ČSAV, Praha, 765 pp.

Prof. Ing. Petr Kubíček, DrSc. (1942), profesor aplikované a experimentální fyziky, nukleární techniky a ekologie. Na čtvrti 14, 705 00 Ostrava-Hrabůvka

**Doc. Ing. Jaromír Drápala, CSc. (1949), vysokoškolský pedagog, katedra materiálového inženýrství Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství, Vysoká škola báňská–TU Ostrava, 708 33 Ostrava-Poruba
E-mail: jaromir.drapala@vsb.cz**

