Zkušenosti z aplikace in-situ mikrovlnného ohřevu horninového prostředí

Jiří Kroužek, Václav Durďák, Jiří Hendrych – Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, **Pavel Špaček** – CHEMCOMEX Praha, a.s.; jiri.krouzek@vscht.cz

Souhrn

Příspěvek přibližuje dosavadní zkušenosti z poloprovozního testování inovativní termické sanační technologie založené na in-situ aplikaci mikrovlnného ohřevu v horninovém prostředí. Tato technologie, jakožto podpůrný prostředek běžných sanačních technik, má vysoký potenciál výrazně zvýšit jejich dekontaminační účinek, a to především v místech s těžko odstranitelnou kontaminací. První fáze poloprovozních zkoušek byla zaměřena na sledování průběhu ohřevu na reprezentativní nekontaminované lokalitě za účelem vyzkoušení vyvinuté techniky v dlouhodobějším provozu. Průběh ohřevu nesaturované zóny byl studován zejména z hlediska prostorové distribuce okolo aplikačního vrtu. Za účelem predikce postupu mikrovlnného ohřevu byl rovněž navržen a s pomocí výsledků pilotní zkoušky ohřevu validován numerický model.

Klíčová slova: in-situ sanační technologie, mikrovlnný ohřev, termická desorpce, venting, SVOCs

Úvod

V současnosti i přes dílčí úspěchy sanací starých ekologických zátěží setrvává nejen v ČR velké množství kontaminovaných míst, jež ohrožují životní prostředí. Řada ekologických zátěží je velmi obtížně řešitelná, především kontaminace málo těkavými organickými látkami (SVOCs), ale i těkavými (VOCs), pomocí běžných sanačních technik, jako jsou venting v případě nesaturované zóny a sanační čerpání v případě saturované zóny. Pro dekontaminace saturované zóny byla v posledních letech vyvinuta a aplikována široká škála intenzivních pokročilých technik, jako jsou in-situ chemická oxidace či reduktivní metody, v poslední době vývoj cílí na překročení jejich současných limitů pomocí kombinace těchto postupů s bioremediačními technikami. Při sanacích nesaturované zóny jsou používané postupy značně jednodušší. Většinou se sanace lokality omezí na odtěžbu kontaminovaného materiálu a jeho odvoz k následnému zpracování, příp. pokud je zemina dostatečně propustná a kontaminant dostatečně těkavý, je aplikován venting (nebo air sparging). Účinnost ventingu je velmi limitovaná situací na dané lokalitě a sanace se i přes původně vhodné podmínky může značně prodlužovat a prodražovat. Odtěžba materiálu spolu s odvozem je značně nákladnou variantou a navíc odvoz materiálu nejčastěji na skládku nebo dekontaminační plochu ji činí také "neekologickou", přesto z řady důvodů je tento postup stále preferovaný.

Projekt aplikovaného výzkumu cílí na vývoj nového prostředku, který v kombinaci se stávajícími metodami dekontaminace přinese výrazné zvýšení účinnosti současných sanačních opatření. Účelem projektu je pomoci přinést do současných postupů založených na kombinaci běžných fyzikálně chemických, chemických a biologických postupech další intenzivní technický prvek ve formě termické podpory. V zahraničí již v minulosti byla několikrát použita tepelná energie při in-situ sanacích. Jednalo se o propařování [1], klasický konduktivní ohřev pomocí topných těles nebo hořáků zaváděných do vrtů [2] či o elektrický odporový ohřev [3], v Německu vědci testovali rovněž radiofrekvenční ohřev [4]. Nicméně tyto technologie z důvodu jejich omezení a ekonomické stránky jejich provozu nedosáhly širšího uplatnění a v českém prostředí doposud k aplikaci nedošlo takřka vůbec. V posledních letech však obecně do řady průmyslových odvětví proniká mikrovlnný ohřev, jehož specifické vlastnosti, jako je především objemový charakter, přináší různým výrobním procesů řadu benefitů [5]. Ve výzkumu již nalézá uplatnění také při dekontaminaci nebezpečných materiálů a ukazuje se, že i v této oblasti tato technika přináší řadu výhod [6].

Tato práce představuje první výsledky aplikovaného výzkumu, jehož cílem je vývoj inovativní techniky založené na přímém in-situ mikrovlnném ohřevu kontaminovaného horninového prostředí. Předpokladem uplatnění této technologie v praxi je přesné zacílení tepelné energie do ohniska znečištění a s tím související nízké ztráty energie, mobilita, spolehlivost a bezpečnost aplikace technologie a prokázaná vysoká účinnost dekontaminace s její pomocí. Vývoj technického řešení se na tyto aspekty zaměřil a na modelové nekontaminované lokalitě byla vyvinutá technika testována za

účelem optimalizace procesu, nabytí ryze praktických zkušeností a především sledování výkonnosti termické technologie.

Metodika testování

Cílem poloprovozních testů bylo sledovat distribuci teploty v okolí vytvořeného aplikačního vrtu. Aplikační vrt slouží k cílené aplikaci mikrovlnného záření do horninového prostředí v určité hloubce. Vyvinutá konstrukce aplikátoru zohledňovala celou řadu podmínek, jako je vymezení místa depozice mikrovln, bezpečnost aplikace pro okolí, účinnost transferu mikrovlnného záření, mechanická a tepelná odolnost aj. Testovací systém je naznačen na Obr. 1. Klíčovými prvky jsou na povrchu mikrovlnný generátor v průmyslovém provedení, tuner pro ladění mikrovlnného odrazu, mikrovlny jsou vedeny do hloubky vlnovodem, který je spojen se speciálně navrženým aplikátorem. Vše je v kovové zárubnici a pečlivě izolováno proti únikům mikrovln do okolí. Mikrovlnná technika je na povrchu umístěna v ochranné klimatizované skříni. Pro sledování teplot v okolí aplikačního vrtu byly v různých vzdálenostech od vrtu vytvořeny monitorovací vrty, do kterých byly umístěny teplotní čidla – termočlánky ve vzdálenějších pozicích od místa depozice mikrovln a optická vlákna v bližších vrtech. Systém vedle online záznamu měřených dat umožňoval vzdálenou správu přes internet.



Obr. 1: Systém měření teploty v okolí aplikačního vrtu

Výsledky a diskuze

Měřicí kampaň se sběrem dat při aplikaci mikrovln do horninového prostředí probíhala v létě 2016 téměř nepřerušovaně 30 dní. Během této doby došlo pouze k několika krátkodobým výpadkům (max.

několik hodin). Po většinu testu byl nastavený plný výkon, pouze během prvních 17 hodin nebyl výkon nastaven na 100 % (6 kW), nýbrž byl postupně zvyšován z důvodu odrazu mikrovln a postupného náběhu zařízení. Rovněž vždy několik desítek minut po každém z výpadků byl výkon snížen na 80 %. Data o distribuci teploty v okolí mikrovlnného aplikačního vrtu byla sbírána nepřetržitě i následujících 20 dní po ukončení procesu za účelem sledování vývoje ochlazování horninového prostředí. Změřené teploty v průběhu testovací kampaně jsou shrnuty na Obr. 2.

Před samotným počátkem pilotního testu proběhlo na lokalitě několik krátkodobějších testů, jež pomohly nastavit některé funkční parametry a pomohly rovněž odhalit některé nedostatky testovacího systému. Jedním z nedostatků se nejprve ukázal výkon použité klimatizace v ochranné skříni pro mikrovlnnou techniku, kdy v horkých letních dnech při nezanedbatelné produkci tepla zařízením a také ohřevem vlnovodné techniky nebyla doposud dostačující klimatizace schopná odvádět vznikající teplo z izolované skříně. Další testy pomohly nastavit správně průtoky chladicí vody a seznámit se s chováním mikrovln z pohledu jejich odrazu měřeného řídicí jednotkou mikrovlnného generátoru. Na počátku všech testů při nízkých teplotách vlnovodu byl odraz záření poměrně vysoký (až 30 %), bylo nutné pečlivě ladit odraz pomocí tuneru a postupně regulovat aplikovaný výkon, aby nedocházelo k obloukovému výboji (detekce součástí průmyslového generátoru mikrovln), jenž spolu s vyšším odrazem byly důsledkem produkce par a jejich zpětné kondenzace na ploše vlnovodu. Po vyhřátí vlnovodu postupně docházelo k poklesu odrazu a bylo možné uvolnit ladicí šrouby tuneru, při dlouhodobém provozu již byl odraz prakticky nulový a mikrovlnný ohřev až na výjimečné výpadky spolehlivý.

Z následujícího grafu shrnujícího průběh ohřevu je patrný velmi rychlý nárůst teploty ve vrtu T1, který je v bezprostřední blízkosti prostoru, kde dochází k interakci mikrovln s materiálem. Pravděpodobně je v této vzdálenosti (cca 30 – 40 cm) od plochy depozice mikrovln na povrch zeminy materiál pod přímým vlivem mikrovlnného záření a k částečné interakci zde rovněž dochází. Mikrovlnné záření je při prostupu materiálem postupně zeslabováno a penetruje účinně pouze do určité hloubky, kterou určují vlastnosti exponované zeminy. Ohřevem však postupně dochází k vysušení matrice, absorpční vlastnosti zeminy klesají a roste penetrace do hloubky. V určité fázi při velmi vysokých teplotách však už může absorpce znovu narůstat a zeslabovat výkon mikrovln v zemině. V ostatních vrtech T-2 a T-3 je již nárůst teplot pozvolnější, převážně způsobený sdílením tepla s mikrovlnami vyhřátou oblastí. Je zřejmé, že s rostoucí vzdáleností teplotního čidla od středu aplikátoru teplota klesá. Lze si povšimnout podobného průběhu ohřevu ve vrtu T-2 v hloubce 240 cm a T-3 v hloubce 340 cm, jejichž vzdálenost od místa nejintenzivnější interakce mikrovln s materiálem je přibližně podobná.

V případě vrtu T1 došlo po dosažení přibližně 95 °C k významnému zpomalení ohřevu, které je dáno energeticky náročnou fázovou přeměnou přítomné vody na vodní páru. Během procesu pravděpodobně dochází k odparu vody v určité vrstvě v okolí plochy aplikátoru, která se postupně rozšiřuje a s postupným přibližováním se této vrstvy k pozici čidla se teplota blíží 100 °C. Po odpaření vody ze zeminy pára opouští tento vyhřátý prostor, čímž vytváří také určitý konvektivní proud tepla. Při této konvekci dochází k dalšímu šíření tepla, přičemž však může vodní pára znovu kondenzovat. Vodní pára tak v zemině sehrává jakousi tlumící roli, kdy pravděpodobně ve větším objemu nedochází k přehřátí zeminy na vyšší stovky °C. Vzdálenější čidla tak v této ustálené fázi se ohřívají rychleji než první vrstvy okolo aplikátoru, teplotní gradient se tak částečně zmenšuje. Nicméně tok tepla směřuje od středu do okolí, zvyšuje se objem vyhřátého média a postupně tak klesá se vzdáleností tepelný tok vztažený na jednotku hmoty, čímž klesá také rychlost ohřevu v daném vzdálenějším bodě tak, jak tomu je v případě vrtu T3.

Po vypnutí aplikace mikrovlnného ohřevu dochází v horninovém prostředí k postupnému poklesu teploty, při němž se teploty mezi jednotlivými čidly postupně vyrovnávají. Teplota v nejteplejším místě klesá rychleji než v případě vrtů vzdálenějších od aplikátoru. To je dáno objemem, který daná teplota v určitém místě reprezentuje. V případě vrtu T-1 s vysokou teplotou je tento objem významně nižší v porovnání se vzdálenějšími vrty. Vyhřátý objem tak přenáší energii do méně vyhřátých větších objemů a teploty se postupně vyrovnávají. Přibližně 20 dní po ukončení aplikace mikrovln se teploty ve vrtech pohybovaly mezi 27 a 31 °C, další pokles teploty je již z důvodu nízké tepelné vodivosti a nízkého teplotního gradientu dle základních zákonů sdílení tepla velmi pozvolný. Po 40 dnech od ukončení aplikace mikrovln se teplota ve vrtech pohybovala mezi 20 – 24 °C a po 70 dnech mezi 16 – 20 °C, ačkoli se jednalo o deštivé a chladné týdny v podzimních měsících s poměrně častým výskytem mrazu v listopadu. Zemina tak vykazovala značnou akumulaci tepla, což může v postsanačních procesech

v zemině sehrát roli zejména z biologického hlediska. Může se tak několik měsíců po aplikaci mikrovln v okolí aplikačního vrtu dobře dařit přítomné mikroflóře a napomoci tak příp. biodegradaci residuální kontaminace v zemině.



Obr. 2: Vývoj teplot během testování v různých monitorovacích vrtech ve dvou hloubkách (r – poloměr přibližného umístění čidla okolo středu aplikačního vrtu, h – hloubka umístění čidla)

Naměřené výsledky teplotních průběhů v různých bodech v okolí aplikačního vrtu do jisté míry potvrzují známá fakta, nicméně ukazují nové poznatky zejména o míře působení a dosahu jednotlivých jevů v jednotlivých sférách vyhřívaného prostoru. V poloměru do přibližně 0,5 m okolo aplikátoru dochází k produkci tepla interakcí mikrovln s matricí, během toho je produkována vodní pára jakožto potenciální nosič energie do hlubších partií matric (při vložení tlakového gradientu), v hlubších partiích již dochází k ohřevu zejména vedením tepla z teplejších oblastí, přičemž hranice mezi těmito oblastmi není zcela ostrá. V okruhu přibližně 1 m okolo aplikačního vrtu (v nesaturované zóně), jak ukazují výsledky, lze poměrně snadno a rychle dosáhnout teploty vyšší než 50 °C, což jak ukazují výsledky laboratorních experimentů je pro značnou část kontaminace dostatečná teplota k efektivnímu odstranění. Je zřejmé, že hranice mezi jednotlivými sférami okolo aplikačního vrtu nebudou vždy stejné, charakter ohřevu závislý na řadě faktorů, především vlastnostech horninového prostředí – vlhkost, porozita, struktura, hustota, které zásadně ovlivňují dielektrické a tepelné vlastnosti. Při aplikaci tlakového gradientu pomocí ventingových vrtů vhodně umístěných v okolí aplikačního vrtu lze na úkor vyrovnání teplotního gradientu v horninovém prostředí dosáhnout efektivní dekontaminační teploty i ve větších vzdálenostech od aplikačního vrtu. Mikrovlny tak potvrzují, že jsou velice účinným nástrojem pro distribuci tepelné energie v horninovém prostředí.

Ačkoli tento test nebyl dostatečně dlouhý pro sledování dalších efektů. Lze očekávat, že jakmile dojde v první zóně okolo aplikátoru k vysušení, tj. když veškerá mikrovlnná energie bude interagovat v suché zemině, jejíž dielektrické vlastnosti jsou výrazně redukované oproti původní vlhké, pozvolna zde teplota může narůst na vyšší stovky °C a posléze může vlivem změny struktury zeminy docházet k rychlému lokálnímu nárůstu teploty a některým nežádoucím mikrovlnným efektům v materiálu (hot-spot, teplotní úlet) vedoucím k vitrifikaci a také ke zvýšení odrazu záření. V takovém případě bude vhodné postupně snižovat výkon aplikovaných mikrovln, příp. praktikovat diskontinuální provoz. Zároveň ale tato rizika budou snižována tokem nosného fluida zeminou, který bude akumulovanou energii distribuovat v zemině.

Model in-situ mikrovlnného ohřevu

Z důvodu specifického průběhu mikrovlnného ohřevu, kdy není předem možné odhadnout dosah a míru interakce mikrovln s materiálem, a tudíž rychlost ohřevu materiálu v okolí aplikačního vrtu, je nutné hledat vhodný matematický aparát, který proces umožní predikovat v závislosti na podmínkách dané lokality. Problematika matematického popisu mikrovlnného ohřevu není nikterak jednoduchá, příliš zjednodušující přístupy se mohou omezit pouze na velmi úzký interval podmínek. Nicméně v této úloze se studovaný proces skládá ze tří nedílně spjatých dějů – interakce materiálu s mikrovlnami (elektromagnetismus), sdílení tepla v materiálu i sdílení hmoty zastoupeným sušením matrice, které je velmi energeticky náročným procesem, nelze ho proto zanedbat. Popis těchto dějů je založen na parciálních diferenciálních rovnicích, (Maxwellovy rovnice, Fourierův zákon aj.), jejichž řešení je pro vymezené okrajové podmínky možné pouze numerickými postupy, které jsou často velmi náročné na výpočty z důvodu nelineárního průběhu. Je účelné a efektivní využít připravených sofistikovaných výpočetních softwarů, pro popis mikrovlnného ohřevu horninového prostředí se hodí především multifyzikální software COMSOL, který uživatelsky příznivým rozhraním umožňuje snadno do modelu zahrnout konkrétní okrajové podmínky pro řešení rovnic pomocí metody konečných prvků (FEM).

Pro sestavení modelu je nutné navrhnout geometrii, která určuje okrajové podmínky z pohledu prostorového uspořádání. Použitá geometrie ve 2D projekci je znázorněna na Obr. 3 (hodnoty v m), pro zjednodušení výpočtu byla použita 2D projekce axisymetrické geometrie, přičemž elektromagnetickou část výpočtu je nutné počítat ve 3D, teplotní distribuce je však osově souměrná. Prostor byl pro výpočet zúžen na poloměr 120 cm kružnice okolo aplikačního vrtu, který tvoří osu systému, což odpovídá systému měření teploty při poloprovozních zkouškách. Dalším důležitým krokem je použití relevantních materiálových vlastností, zejména dielektrických a tepelných. Na Obr. 4 je uvedena odhadnutá závislost složek relativní permitivity na teplotě, která přibližně odpovídá písčité zemině přítomné na testované lokalitě a byla měřena autorem na specializované zahraničním pracovišti. Důležitá je zejména charakterizace změny ztrátového faktoru (eps-imag) po vysušení matrice při 100 °C. Další charakterizace navrženého modelu je popsána dále stručněji.



Obr. 3: Grafické znázornění geometrie modelu, osa x představuje poloměr od osy souměrnosti (r=0), rozměry jsou v [m].

Obr. 4: Data závislosti dielektrických parametrů zeminy vstupující do modelu

Základní parciální diferenciální rovnice platné v celé modelované oblasti definované geometrií modelu (Obr. 3):

Elektromagnetické vlny ve frekvenční doméně

vlnová rovnice

$$\nabla \times \mu_r^{-1}(\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2(\varepsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega \epsilon_0})\mathbf{E} = \mathbf{0}$$

Zápatí vyhrazeno pro redakci • Zápatí vyhrazeno pro redakci •

Sdílení tepla v pevných látkách s fázovou změnou

$$\rho C_{\mathbf{p}} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_{\mathbf{p}} \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + \zeta$$

Charakterizace veličin v modelu:

- E intenzita elektrického pole [V/m], vektorová veličina řešená pro třísložkový vektor (E_r , E_{φ} , E_z), základní proměnná elektromagnetické části výpočtu.
- T absolutní teplota [K], základní proměnná sdílení tepla, jejíž výpočet je cílem úlohy, počáteční teplota je 288,25 K, což odpovídá přibližně počátečním podmínkám na lokalitě v nesaturované zóně a jedná se také o počátek intervalu definujícího materiálové vlastnosti.
- µ_r relativní permeabilita, základní materiálová vlastnost popisující chování materiálu v magnetickém poli, rovno 1, tzn. stejná jako permeabilita vakua, studovaný systém nevykazuje magnetické vlastnosti a nepodílí se tedy na ohřevu materiálu.
- *c*_r relativní permitivita, základní materiálová vlastnost popisující chování materiálu v elektrickém poli, jenž zásadním způsobem kontroluje interakce materiálu s mikrovlnami, a tedy i mikrovlnný ohřev, komplexní charakter tvořená reálnou a imaginární složkou (dielektrický ztrátový faktor), jejichž hodnoty jsou funkcí teploty (viz Obr. 4) a frekvence (konstantní), permitivita je charakterizovaná následujícími vztahy:

 $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$

 $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$

 $\boldsymbol{\epsilon}_{0}$ - relativní permitivita vakua

 ϵ – reálná složka komplexní permitivity

e" – imaginární složka komplexní permitivity

 k_0 – vlnové číslo ve vakuu [rad/m], určeno prvním krokem numerické simulace – analýza vidu na okraji

 σ – elektrická vodivost [S/m], pro T < 100 °C 0,001 S/m, pro T > 100 °C – 0,0001 S/m

 ω – úhlová frekvence [rad/s], $\omega = 2\pi f$, kdy f = 2,45 GHz frekvence aplikovaných mikrovln

 ρ – hustota, 1600 kg/m³

 $C_{\rm p}$ – tepelná kapacita - pro T < 100 °C 1200 J/(kg·K), pro T > 100 °C 800 J/(kg·K)

t – čas

k – tepelná vodivost, pro T < 100 °C 1,5 W/(m·K), pro T > 100 °C 0,2 W/(m·K)

u – vektorová rychlost proudění fluida [m/s], určuje, zda skrz geometrii proudí nějaké fluidum, které může konvektivně přenášet energii, u = 0

Q – celkové teplo ze zdroje [W], určeno produkcí tepla interakcí mikrovln s materiálem

Výsledky modelování průběhu in-situ mikrovlnného ohřevu dle navrženého modelu ukazuje Obr. 5. Označení jednotlivých křivek odpovídá umístění měřicích sond v testovaném prostoru v průběhu poloprovozních testů provedených na lokalitě. Pokud vypočtená data zkonfrontujeme s naměřenými daty, které jsou shrnuty na Obr. 2, je patrná dostatečně dobrá shoda modelu s reálně změřenými daty, ačkoli je možné pozorovat jisté odchylky. Nejbližší bod T1 vykazoval v reálném prostředí vyšší teplotu. která poměrně rychle vystoupala na hodnotu vyšší než 90 °C, přičemž podobně jako při simulaci nárůst teploty zpomalil. Při numerické simulaci se ohřev materiálu zpomalil již od teploty 60 °C a po dosažení 100 °C naopak začal znovu strmě růst. Ostatní body v materiálu ve větších vzdálenostech podle simulace nevykazovaly téměř žádný teplotní gradient, nýbrž ohřev probíhal poměrně lineárně. To odpovídá zjednodušení v podobě určení konstantní tepelné vodivosti materiálu v tomto teplotním intervalu, jež je důležitou veličinou procesu sdílení tepla v matrici. Oproti tomu při poloprovozních testech byl pozorován gradient teploty mezi měřicími vrty vzdálenými od aplikačního vrtu 80 a 120 cm v různých hloubkách. Teplota změřená v bodě T2A dobře odpovídá hodnotám a průběhu ohřevu vypočítaném navrženým modelem, v ostatních bodech byla dosažena nižší teplota mezi 45 – 65 °C. Pozorované odchylky matematického modelu od skutečnosti jsou způsobené několika aspekty. Jednak v modelu bylo zavedeno několik zjednodušujících předpokladů, dále rozhodující materiálové vlastnosti byly pouze odhadovány a především znalosti o teplotní závislosti těchto materiálových vlastnostech jsou značně omezené, v neposlední řadě je odchylka modelu způsobená nepřesnou lokalizací měřicích čidel při poloprovozních testech, která se mohla lišit v rozmezí 10 cm v dané vzdálenosti okolo aplikačního vrtu.



Obr. 5: Průběh ohřevu v několika bodech v okolí mikrovlnného aplikátoru

Závěr

Pomocí pilotního 30 denního testu in-situ mikrovlnného ohřevu horninového prostředí byla prokázána vhodnost a efektivita navrženého technického řešení pro aplikaci mikrovln jakožto podpůrného prostředku pro běžné sanační technologie, především ventingu. Dlouhodobější testování ukázalo spolehlivost a stabilitu techniky, pomohlo proces optimalizovat a naznačilo průběh ohřevu v prostoru okolo aplikačního vrtu. Testy zároveň pomohly navrhnout a validovat matematický model, který umožňuje odhadnout průběh ohřevu při jeho aplikaci při reálných sanačních projektech. Tento projekt aplikovaného výzkumu pokračuje v následující sezóně aplikací vyvinuté a otestované techniky na reálné lokalitě se starou ekologickou zátěží. V současnosti již mají řešitelé projektu poměrně přesné povědomí o průběhu mikrovlnného ohřevu a dle výsledků laboratorních experimentů také o potřebných cílových teplotách pro vybrané kontaminace (BTEX, ropné látky). Pilotní test technologie v roce 2017 tyto výsledky a celý technologický koncept ověří v měřítku blízkém reálnému uplatnění. Dosavadní zkušenosti naznačují, že tato technika může významně urychlit a zefektivnit sanační zásahy především v nesaturované zóně, čímž v důsledku dojde ke snížení ekonomické náročnosti i přes vyšší investiční nároky a krátkodobé zvýšené nároky na energii.

Poděkování

Výzkum představený v tomto příspěvku byl financován z projektu aplikovaného výzkumu TA04020435 *Vývoj a ověření technologie pro účely intenzifikace in-situ sanačních opatření* z programu TAČR Alfa.

Literatura

- 1. Gudbjerg, J. (2003). Remediation by steam injection. <u>Environment and Resources DTU</u>, Technical University of Denmark. **Dissertation Thesis.:** 137.
- Bierschenk, J. M., et al. (2008). <u>Thermally enhanced soil vapor extraction closing DNAPL sites case studies</u>. Sixth International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, Monterrey, Batelle Press, Columbus.
- 3. Smart, J. L. (2005). "Application of six-phase soil heating technology for groundwater remediation." <u>Environmental Progress</u> **24**(1): 34-43.
- 4. Roland, U., et al. (2007). "Results of field tests on radio-wave heating for soil remediation." <u>Environmental</u> <u>Science & Technology</u> **41**(24): 8447-8452.
- 5. Meredith, R. (1998). <u>Engineers' Handbook of Industrial Microwave Heating</u>. London, UK, Intitution of Electrical Engineers (IEE).

Zápatí vyhrazeno pro redakci • Zápatí vyhrazeno pro redakci •

6. Wu, T. N. (2008). "Environmental perspectives of microwave applications as remedial alternatives: review." Practice Periodical of Hazardous, Toxic and Radioactive Waste Management **12**(2): 102-115.