

Zdzisław Kawala, Tomasz Atamańczuk

Zastosowanie prądów wysokiej częstotliwości i mikrofal do oczyszczania gruntów z substancji ropopochodnych

Zanieczyszczenie gruntów w wielu krajach zaczyna być w ostatnich latach dostrzegane jako poważny problem i traktowane na równi z zanieczyszczeniem wód i powietrza. Warstwy gruntu, stanowiące naturalny filtr dla wód opadowych, są często zanieczyszczone odpadami chemicznymi, takimi jak substancje ropopochodne, rozpuszczalniki organiczne, chlorowcopochodne czy też metale ciężkie. Zanieczyszczenia te migrując w głąb ziemi skażają warstwy wodonośne i stają się zagrożeniem dla zdrowia ludzi. W ciągu ostatniej dekady w krajach Europy Zachodniej, jak również w Stanach Zjednoczonych i Kanadzie, opracowano szereg metod odnowy zanieczyszczonych gruntów, z których kilka znalazło szerokie zastosowanie w praktyce. Były to początkowo techniki polegające na oczyszczaniu gleby po jej wcześniejszym wydobyciu [1]. Powodzeniem cieszyły się zwłaszcza procesy wysokotemperaturowe, ekstrakcja rozpuszczalnikami czy też bioremediacja.

W ostatnich latach, w związku z coraz większą liczbą zidentyfikowanych obszarów zanieczyszczonych, znacznie większy nacisk kładzie się na rozwijanie i stosowanie metod *in situ*, umożliwiających oczyszczenie gruntu w miejscu skażenia [2]. Powodem odchodzenia od metod *off site* jest na pewno wysoki koszt wydobycia i transportu gleby do miejsca obróbki, sięgający nieraz 50% całkowitych kosztów procesu. Z drugiej strony techniki *in situ* pozwalają na zachowanie specyficznej struktury gleby, odpowiedzialnej za rozwój życia biologicznego, niezbędnego do późniejszej rekultywacji gleby. Koszt oczyszczenia tony gleby jest niebagatelny i waha się od 80 do 1200 DEM [3]. Rozbieżność ta jest uwarunkowana specyfiką zanieczyszczonego miejsca (rodzaj gleby i jej przepuszczalność, głębokość zalegania zanieczyszczeń), rodzajem zanieczyszczeń (lotność, właściwości fizyczno-chemiczne), wyborem metody (*in situ*, *off site*, *on site*) i wieloma innymi czynnikami. Szczególnie trudne jest oczyszczenie gleby w terenach zaludnionych, gdzie mogą być stosowane głównie procesy *in situ*.

Lista metod zalecanych przez Agencję Ochrony Środowiska Stanów Zjednoczonych (USEPA), które są stosowane na skalę przemysłową, jak i tych będących jeszcze w stadium badań aplikacyjnych, jest długa i przekracza już 100 pozycji. Pomimo to wciąż szuka się nowych rozwiązań, niedroгих, a zarazem mogących znaleźć zastosowanie w jak najszerszym zakresie. Najwyższą skuteczność oczyszczania gleby, ponad 99%, przy jednocześnie krótkim czasie procesu, zapewniają metody wysokotemperaturowe.

Obiecującą grupę stanowią techniki *in situ*, w których dostarczenie ciepła do gruntu odbywa się za pomocą prądów niskiej i wysokiej częstotliwości. Energia elektryczna lub elektromagnetyczna dostarczana jest do gruntu za pomocą anten umieszczonych w odwiertach. Energia zaabsorbowana przez wodę, glebę i zanieczyszczenia zostaje następnie wyzwolona w formie ciepła, powodując wzrost temperatury złoże. Zanieczyszczenia organiczne, znajdujące się w glebie w fazie ciekłej lub zaadsorbowanej, odparowują lub desorbują do powietrza gruntowego. Zastosowanie podciśnienia wymusza przepływ powstających oparów w stronę studni odsysających, a następnie – już na powierzchni – następuje ich kondensacja lub adsorpcja na filtrach z węglem aktywnym.

W niniejszym artykule omówiono podstawowe mechanizmy ogrzewania dielektrycznego i przykłady jego zastosowania w technikach oczyszczania gruntów. W dalszej części pracy przedstawiono rezultaty badań laboratoryjnych nad oczyszczaniem gleby i piasku z substancji ropopochodnych przy wykorzystaniu energii mikrofal. Przedyskutowano także wpływ lotności i polarności zanieczyszczeń na przebieg i efektywność oczyszczania gleby oraz zbadano wpływ wilgoci obecnej w złoże na zjawisko destylacji z parą wodną.

Zastosowanie prądu (60 Hz) oraz fal radiowych

W środowisku gleby zanieczyszczenia organiczne mogą występować w wolnej fazie ciekłej, fazie gazowej (zaadsorbowanej bądź zaabsorbowanej) oraz rozpuszczone w wodzie. Rozkład zanieczyszczeń pomiędzy poszczególne fazy jest uzależniony od stałych równowagowych. W wielu wypadkach stężenie zanieczyszczeń w gruncie jest na tyle wysokie, że przeważająca ich część (ponad 90%) występuje w formie wolnej fazy ciekłej. Prężność par nad cieczą dla substancji organicznych zależy bezpośrednio od temperatury i może być opisana zależnością:

$$\log p = b - [0,05223a/(t + 273)] \quad (1)$$

gdzie:

p – ciśnienie pary nasyconej, mmHg

t – temperatura, °C

a, b – stałe doświadczalne, –

Zgodnie z powyższym równaniem, niewielki wzrost temperatury wywołuje znaczny wzrost stężeń zanieczyszczeń w fazie gazowej. Ponieważ zanieczyszczenia w postaci par usuwane są z gleby przy pomocy studni odsysających, wzrost temperatury znacznie poprawia wydajność metody, a powstający w efekcie ogrzewania dielektrycznego gradient ciśnienia staje się siłą napędową procesu.

Dostarczanie ciepła *in situ* do gruntu za pomocą konwencjonalnych źródeł energii jest trudne lub też nieuzasadnione ekonomicznie. Wykorzystuje się więc w tym celu prądy wysokiej i niskiej częstotliwości, dostarczane do gleby za pomocą elektrod umieszczonych w specjalnych odwiertach. Idea wykorzystania tego typu technik nie jest nowa. Zarówno prąd elektryczny (60 Hz) jak i fale radiowe (kHz–MHz) znalazły zastosowanie w przemyśle rafineryjnym w latach siedemdziesiątych do wydobywania bitumenu z formacji piaszczystych znajdujących się na dużych głębokościach [4,5]. Bitumen – substancja stała – pod wpływem fal radiowych lub prądu o częstotliwości 60 Hz ogrzewając się osiągał stan płynny, po czym możliwe stawało się jego odpompowanie. Techniki te zostały zaadaptowane w latach 80. i 90. do prób oczyszczania terenów lotnisk zanieczyszczonych substancjami ropopochodnymi. Metody te umożliwiają oczyszczenie gleby *in situ* poprzez umieszczenie w niej specjalnych elektrod służących dostarczeniu energii do gruntu, a umieszczone w glebie perforowane szyby, lub znajdujące się na powierzchni namioty próżniowe, mają na celu odsysanie i odbieranie powstających oparów związków organicznych [6,7].

W wypadku prądów o niskiej częstotliwości (60 Hz) proces opiera się na efekcie Joule’a-Lenza i ogrzewaniu omowym. Ciepło rozproszone w sąsiedztwie anten jest funkcją parametrów elektrycznych złoża i natężenia pola elektrycznego i może być opisane wyrażeniem:

$$P = \int_V \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} dV \quad (2)$$

gdzie:

P – moc rozproszona w objętości V, W

J – gęstość prądu, A/m²

E – natężenie pola elektrycznego, V/m

Wzrost temperatury jest jednakże w tym wypadku bardzo powolny. W badaniach [8], nad oczyszczeniem około 90 m³ gleby ze związków lotnych i półlotnych, dostarczono do gleby przez 47 dób blisko 10 tys. kWh, co doprowadziło do wzrostu jej temperatury zaledwie o 22 °C. Dodatkowym technicznym problemem było intensywne odparowywanie wody z bezpośredniego sąsiedztwa elektrod, co doprowadzało do zaniku przewodzenia i wyładowań elektrycznych.

Zupełnie inaczej przebiega dostarczanie ciepła w wypadku zastosowania fal elektromagnetycznych, tj. fal radiowych czy też mikrofal. Ogrzewanie objętościowe dielektryków polega na rozproszeniu części energii pola elektromagnetycznego przez medium i jej konwersji w energię cieplną. Pod wpływem pola elektromagnetycznego dipole wody i innych polarnych substancji obecnych w glebie ulegają rotacji i w wyniku tarcia międzycząsteczkowego i innych mechanizmów doprowadzają do wydzielania się dużych ilości ciepła [9].

Szczególnie intensywnie nagrzewają się substancje polarne, których głównym przedstawicielem jest woda. Ilość wyzwolonego ciepła w jednostce objętości zależy bezpośrednio od częstotliwości przyłożonego pola elektromagnetycznego oraz parametrów dielektrycznych traktowanego medium [10–11]:

$$P = 55,6325 \cdot 10^{-12} f \epsilon_r' \tan \delta E_{lok}^2 \quad (3)$$

gdzie:

P – moc rozproszona w objętości V, W

f – częstotliwość prądu, Hz

ϵ_r' – względna stała dielektryczna, –

$\tan \delta$ – tangens kąta strat, –

E_{lok} – natężenie lokalnego pola elektrycznego, V/m

Z drugiej strony głębokość penetracji fal, tzn. głębokość, na której zostają one stłumione do około 36% swej początkowej amplitudy, jest odwrotnie proporcjonalna do częstotliwości:

$$d = \frac{1}{2 f \pi} \left[\frac{\mu \epsilon'}{2} (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1) \right]^{-0,5} \quad (4)$$

gdzie:

d – głębokość penetracji fal elektromagnetycznych, m

ϵ' – stała dielektryczna, F/m

μ – przenikalność magnetyczna, T·m/A

Powyższe wzory sugerują, że w celu osiągnięcia wysokiej efektywności ogrzewania i szybkich przyrostów temperatury gruntu należy stosować fale o jak najwyższej częstotliwości. Z drugiej strony, ze wzrostem częstotliwości, maleje zasięg działania fal i przy zbyt wysokich ich wartościach ogrzewanie dielektryczne ogranicza się tylko do bezpośredniego sąsiedztwa elektrody. Dobór częstotliwości fal musi być więc optymalny, aby dostarczanie ciepła było efektywne i odbywało się w jak największej objętości gruntu.

Próby nad zastosowaniem fal radiowych o częstotliwościach 6+13 MHz do oczyszczania gruntów zostały przeprowadzone na terenach lotnisk zanieczyszczonych olejem napędowym. W dotychczasowych pracach [12–14] stosowano system trzech (względnie dwóch) równoległych rzędów elektrod, które tworzyły prostopadłościenny analog kabla koncentrycznego. W ten sposób promieniowanie rozchodzące się w gruncie zostało zamknięte w przestrzeni określonej przez rzędy anten. Powstające w glebie opary były odsysane za pomocą namiotów próżniowych znajdujących się na powierzchni bądź też same elektrody były perforowane, służąc jednocześnie za studnie odsysające.

W ten sposób oczyszczano blok gleby o objętości około 16 m³ przez okres 13 dób. W wyniku przeprowadzonych doświadczeń udało się usunąć ponad 96% substancji ropopochodnych obecnych w gruncie, a końcowa temperatura złoża wynosiła około 150 °C. W przeprowadzonych badaniach do ogrzewania gleby stosowano nadajniki o mocy 30 kW i 50 kW. Istotnym mankamentem tego rodzaju aparatury jest bardzo wysoki koszt budowy i eksploatacji nadajnika o tak dużej mocy, jak również skomplikowany system kontrolno-zabezpieczający (tab.1).

Mikrofale tworzą odrębną dziedzinę fal elektromagnetycznych o częstotliwościach w zakresie 100 MHz–300 GHz. Ze względu na wyższe częstotliwości, ogrzewanie mikrofalowe jest znacznie szybsze i intensywniejsze, niż przy zastosowaniu fal radiowych i znalazło szerokie zastosowanie w wielu przemysłowych procesach suszenia i ogrzewania, czego najbardziej popularnym przykładem są kuchenki mikrofalowe.

W koncepcji autorów niniejszego artykułu dostarczanie energii mikrofalowej do zanieczyszczonego gruntu odbywałoby się za pośrednictwem szeregu pracujących niezależnie anten wyposażonych w osobne generatory mikrofal. Zapobiega się w ten sposób budowie generatora dużej mocy, który może zostać zastąpiony przez tanie i masowo produkowane

Tabela 1. Koszty oczyszczenia jednej tony gleby przy zastosowaniu fal radiowych [13]

Osiągnięta temperatura gleby °C	Przedział kosztów operacyjnych USD/t	Koszt przy wilgotności gleby 10% * USD/t
90	32+52	39
150	59+159	89

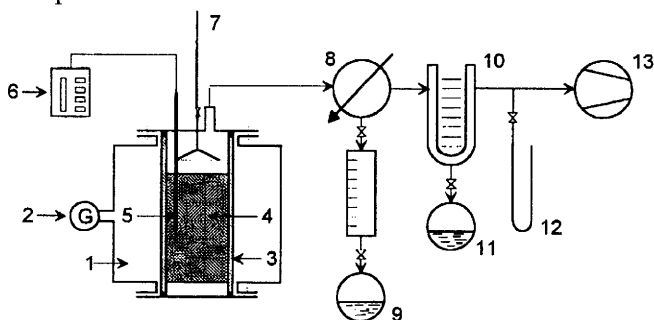
* koszt energii elektrycznej 0,1 USD/kWh

generatory stosowane w kuchenkach mikrofalowych o mocy około 750 W i częstotliwości 2450 MHz. Koszt takiego magnetronu nie przekracza w hurcie 15 USD, podczas gdy magnetron o mocy 6 kW, a więc o ośmiokrotnie większej, kosztuje około 3300 USD [15]. System generatorów małej mocy jest bardzo elastyczny i pozwala na dowolny rozkład anten w oczyszczanym gruncie i ich dowolną liczbę. Ponieważ każda antena jest zasilana indywidualnie i pracuje niezależnie od pozostałych, niepotrzebne staje się ich wzajemne dopasowanie elektryczne i budowa układu kontrolno-zabezpieczającego. Ewentualne awarie poszczególnych węzłów mogą zostać usunięte bez konieczności wyłączenia całego systemu.

Poniżej przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych mających na celu określenie wpływu parametrów dielektrycznych zanieczyszczeń organicznych oraz wilgotności gleby na przebieg oczyszczania gruntu.

Metodyka badań i aparatura

Zaprojektowano i zbudowano aparaturę eksperymentalną pozwalającą na ogrzanie zanieczyszczonej gleby (rys.1). Zastosowano generator mikrofal o mocy 600 W, pracujący przy częstotliwości 2450 MHz. Mikrofałe transmitowane były do komory, w której zainstalowano kwarcową kolumnę (średnica wewnętrzna 90 mm, wysokość 500 mm). Próbkę zanieczyszczonego piasku bądź gleby umieszczono w kolumnie, a następnie poddano działaniu mikrofal. Szczyt kolumny połączony był z systemem skraplaczy, manometrem i pompą próżniową. Powstające w glebie, w wyniku ogrzewania, opary zanieczyszczeń odsysano pod ciśnieniem 660 Tr. Zastosowanie niższego ciśnienia obniżyłoby temperaturę wrzenia zanieczyszczeń, lecz byłoby trudne do uzyskania w większej skali. Opary opuszczające kolumnę były skraplane w kondensatorze oraz wymrażarce, a wyskalowane odbieralniki pozwalały zmierzyć przyrost objętości otrzymanego destylatu w trakcie trwania procesu.



Rys. 1. Laboratoryjna aparatura mikrofalowa (1 – komora mikrofalowa, 2 – generator mikrofal (G), 3 – kolumna kwarcowa, 4 – zanieczyszczona gleba, 5 – sonda termoparowa, 6 – elektroniczny miernik temperatury, 7 – zrascacz, 8 – skraplacz, 9, 11 – odbieralniki destylatu, 10 – wymrażarka, 12 – manometr, 13 – pompa próżniowa)

Próbki piasku i gleby zanieczyszczono związkami organicznymi o różnej polarności i lotności (tab.2). We wszystkich testach początkowe stężenie zanieczyszczeń utrzymywano na poziomie 5%. Próbkę złoża umieszczono w kolumnie

kwarcowej i ogrzewano. Proces ogrzewania mikrofalowego prowadzono do momentu, kiedy stwierdzono brak przyrostu objętości odbieranego destylatu. Próbkę złoża przed i po oczyszczeniu były analizowane na chromatografii.

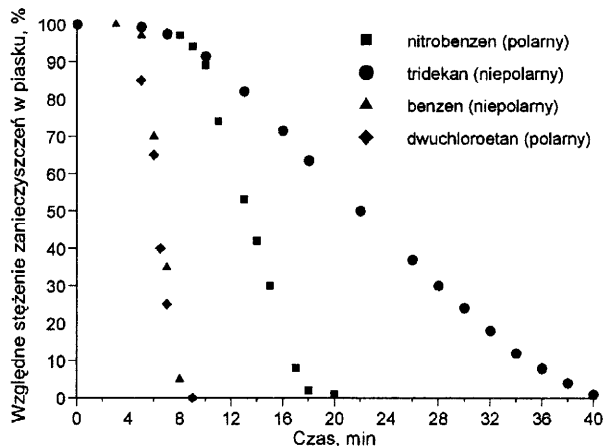
Część badań prowadzona była przy wilgotności początkowej gleby 10+15%. W niektórych z nich woda była dostarczona dodatkowo w trakcie procesu w celu zapewnienia ciągłej generacji pary wodnej w złożu. W testach z parą wodną odbierano dwie fazy destylatu, tj. fazę wodną i organiczną.

Wyniki badań

Wpływ polarności zanieczyszczeń

Wyzwolenie ciepła, będące skutkiem działania mikrofal, jest uzależnione od właściwości dielektrycznych ogrzewanej substancji, w tym wypadku skażonej gleby. Tak zwane dielektryki stratne mają szczególną właściwość tłumienia fal elektromagnetycznych i ich konwersji w energię cieplną. Są to związki polarne o niesymetrycznej strukturze, charakteryzujące się wysokimi wartościami względnej stałej dielektrycznej (ϵ_r') i kąta stratności ($\tan\delta$) [10,11].

Chcąc określić wpływ właściwości dielektrycznych niektórych zanieczyszczeń chemicznych obecnych w glebie na przebieg procesu oczyszczania, przeprowadzono badania nad oczyszczaniem piasku ze związków o różnych polarnościach i lotnościach (rys.2). Związki lotne i półlotne (tab.2) zostały dobrane w ten sposób, aby przy podobnych lotnościach różniły się znacznie polarnością.



Rys. 2. Wpływ polarności i lotności zanieczyszczeń na szybkość procesu oczyszczania

W badaniach nad usuwaniem związków lotnych, tj. benzenu i 1,2-dichloroetanu, nie zaobserwowano istotnych różnic w przebiegu procesu, chociaż oczekiwano szybszego usunięcia dwuchloroetanu jako związku polarnego. Obydwie substancje zostały usunięte całkowicie ze złoża w czasie 9 min, a końcowa temperatura gleby w obydwu wypadkach była bliska temperaturze wrzenia zanieczyszczeń i wynosiła około 80 °C. Pomimo istotnych różnic w polarności zanieczyszczeń uzyskane profile temperatur i stężeń miały bardzo zbliżone przebiegi.

Tabela 2. Temperatury wrzenia i właściwości dielektryczne wybranych substancji (w temp. 20°C)

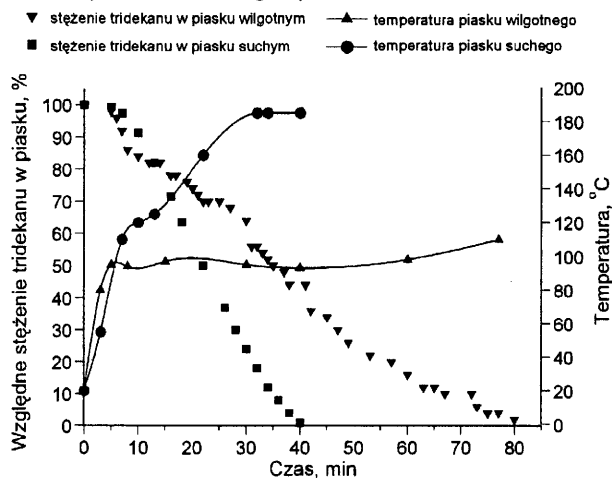
Związki polarne				Związki niepolarne			
Nazwa	Temp. wrzenia °C	Stała dielektryczna	Moment dipolowy D	Nazwa	Temp. wrzenia °C	Stała dielektryczna	Moment dipolowy D
1,2-Dichloroetan	83,6	10,65	1,8	Benzen	80,3	2,28	0
Nitrobenzen	211	35,74	4,3	Tridekan	234	2,00	0

Przyczyną tego mogła być pewna ilość wilgoci zaadsorbowanej na powierzchni ziaren piasku, odpowiedzialna w dużym stopniu za intensywny wzrost temperatury w obydwu wypadkach. Istotne różnice zaobserwowano natomiast podczas oczyszczania piasku ze związków półlotnych, tj. tridekanu i nitrobenzenu. Temperatura końcowa złoża po procesie w obydwu wypadkach wyniosła około 200 °C, jednakże czas usuwania polarnego nitrobenzenu z piasku był dwukrotnie krótszy niż tridekanu. We wszystkich testach oczyszczania piasku ze związków lotnych i półlotnych ponad 99% z nich zostało ze złoża usunięte, a proces przebiegał znacznie efektywniej w wypadku związków polarnych [16,17].

Wpływ wilgotności gruntu

Badania opisane powyżej prowadzono w środowisku piasku suchego w celu określenia wpływu właściwości dielektrycznych zanieczyszczeń na przebieg procesu. W rzeczywistości faza wodna występuje zawsze w glebie, a jej zawartość często przekracza 30%. Jest więc ona główną substancją absorbującą mikrofałę i rozpraszającą ciepło. W takich wypadkach temperatura złoża szybko osiąga 100 °C i proces przebiega dalej w stałej temperaturze, dopóki nie zostanie z gleby usunięta wilgoć. Wraz z generowaną parą usuwane są zanieczyszczenia i cały proces przebiega w warunkach destylacji z parą wodną.

Na rysunku 3 przedstawiono zmiany stężeń i profile temperatury podczas badań nad usuwaniem tridekanu w przypadku złoża suchego i przy zapewnieniu jego stałej wilgotności. Ponieważ w drugim wypadku energia mikrofał została w dużej części przeznaczona na odparowanie wody, proces trwał znacznie dłużej niż w wypadku piasku suchego, gdzie cała energia mikrofał została wykorzystana na podniesienie temperatury gruntu i odparowanie tridekanu. Obecność wilgoci pozwoliła jednak na całkowite usunięcie półlotnego tridekanu w temperaturze nie przekraczającej 100 °C. Stworzenie tak zachowawczych warunków procesu zapobiegało ewentualnemu spaleni materii humusowej, która jest ważnym składnikiem gleby.

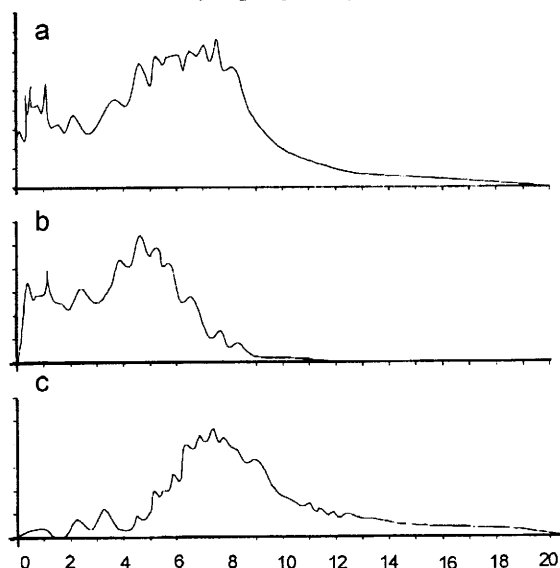


Rys. 3. Profile temperatur i stężeń w procesie usuwania tridekanu z piasku o różnych wilgotnościach

W badaniach prowadzonych w warunkach destylacji z parą wodną proces przebiegał w warunkach ustalonych, a obydwie fazy, tj. wodna i organiczna (tridekan), odbierane były przez cały czas trwania procesu w stałych proporcjach. Obliczone, w oparciu o zasady destylacji z parą wodną, teoretyczne zapotrzebowanie na wodę niezbędną do odparowania tridekanu było bardzo zbliżone do wartości eksperymentalnej (różnica 14%).

Usuwanie substancji ropopochodnych

Ogrzewanie mikrofałowe zastosowano również do oczyszczania próbek gleby zanieczyszczonej benzyną i olejem napędowym. W badaniach, których wyniki przedstawiono na rysunku 4, glebę humusową o wysokiej zawartości materii organicznej i początkowej wilgotności 40% zanieczyszczono olejem napędowym. Proces prowadzono przez 1 godz. do momentu usunięcia z gleby całej wilgoci. Temperatura w tym czasie nie przekroczyła 100 °C, a proces przebiegał na zasadach destylacji z parą wodną. Na rysunku 4b pokazano lotne i półlotne węglowodory, które zostały w tym czasie usunięte w około 50%, co świadczyło o małej efektywności procesu. Trudno lotne węglowodory pozostałe w glebie pokazuje chromatogram na rysunku 4c. Dalsze prowadzenie ogrzewania mikrofałowego, już po usunięciu wody, prowadziło do gwałtownego wzrostu temperatury i spalania części materii organicznej. Aby zapewnić zachowawczy przebieg oczyszczania należy więc utrzymywać stałą wilgoć w glebie przez dodawanie nowych porcji wody.



Rys. 4. Chromatogramy uzyskane podczas oczyszczania gleby humusowej z oleju napędowego (a – skład oleju w glebie przed procesem, b – skład odebranego destylatu, c – skład pozostałości w glebie po 1 godz. trwania procesu)

Podobne badania przeprowadzono dla piasku, symulującego glebę piaszczystą o niskiej zawartości materii humusowej, również zanieczyszczonego olejem napędowym. W tym wypadku prowadzono proces aż do momentu całkowitego oczyszczenia złoża z zanieczyszczeń. Analiza chromatograficzna piasku oczyszczonego po 3 godz. wykazała śladowe ilości trudno lotnych węglowodorów, a końcowa temperatura złoża osiągnęła 260 °C.

Podsumowanie

Uzyskane wyniki badań wskazują na przydatność ogrzewania mikrofałowego do oczyszczania gruntów skażonych substancjami ropopochodnymi. Proces ten jest bardzo szybki, w porównaniu do innych metod, a jego efektywność zależy od dielektrycznych i fizyczno-chemicznych właściwości zanieczyszczeń i złoża. Umożliwia on usunięcie ze złoża związków lotnych i półlotnych i jest szczególnie wydajny wobec substancji polarnych. W obecności wilgoci proces oczyszczania złoża, zarówno ze związków polarnych jak i niepolarnych, może być opisany ilościowo zgodnie z prawami destylacji

z parą wodną. Proces przebiega wówczas w warunkach ustalonych, a temperatura złoża nie przekracza 100 °C, co ma szczególne znaczenie przy zachowawczym oczyszczaniu gleb bogatych w materię organiczną, gdzie zbyt wysoka temperatura może doprowadzić do spalenia substancji humusowych. Obecnie trwają badania w skali pilotowej, wykorzystujące antenową aparaturę mikrofalową umożliwiającą dostarczanie energii mikrofal i oczyszczanie gleby *in situ*.

LITERATURA

1. W. ADAMSKI: Nowoczesne technologie rekultywacji skażonych gleb. *Ochrona Środowiska*, 1990, nr 1-2(48-49), ss. 7-17.
2. G. FURDYN, Z. KAWALA: Odnowa zanieczyszczonych gruntów metodami *in situ*. *Ochrona Środowiska*, 1996, nr 2(61), ss. 27-37.
3. M. STREICH, G. LAUERMANN, K. MEISTER: Special requirements for calculation methods for soil decontamination processes. *Fluid Phase Equilibria*, 1991, No. 70, pp. 165-173.
4. F. S. CHUTE, F. E. VERMEULEN: Present and potential applications of electromagnetic heating in the in-situ recovery of oil. *AOSTRA J. Res.*, 1988, Vol. 4, No. 1, pp. 19-33.
5. G. C. SRESTY, H. DEV, R. H. SNOW, J. E. BRIDGES: Recovery of bitumen from tar sand deposits with the radio frequency process. *SPE Reservoir Engineering*, 1986, No. 1, pp. 85-94.
6. P. JUTTERSCHENKE: Thermische In-situ-Bodensanierung mit Hochfrequenzenergie. *Terra-Tech*, 1994, Vol. 3, No. 2, pp. 57-59.
7. C. D. DOWNEY, M. G. ELLIOTT: Performance of selected in situ soil decontamination technologies: An Air Force perspective. *Environmental Progress*, 1990, Vol. 9, No. 3, pp. 169-173.
8. H. M. BUETTNER, W. D. DAILY: Cleaning contaminated soil using electrical heating and air stripping. *Journal of Environmental Engineering*, 1995, Vol. 121, No. 8, pp. 580-588.
9. J. THUERY: *Microwaves*. Artech House Inc., 1992.
10. H. PUSHNER: Heating with microwaves. Cleaver-Hume Press Ltd., 1966.
11. A. C. METAXAS, R. J. MEREDITH: Industrial microwave heating. Peter Peregrinus Ltd., 1983.
12. H. DEV, G. C. SRESTY, J. BRIDGES, D. DOWNEY: Field test of the radio frequency in-situ soil decontamination process. Proc. at Superfund 88 National Conference in Washington D.C., 1988.
13. W. A. EDELSTEIN, I. E. T. IBEN, O. M. MUELLER, E. E. UZGIRIS, H. R. PHILIPP, P. B. ROEMER: Radiofrequency ground heating for soil remediation: Science and Engineering. *Environmental Progress*, 1994, Vol. 13, No. 4, pp. 247-252.
14. H. DEV, P. CONDORELLI, J. BRIDGES, C. ROGERS, G. DOWNEY: In situ radio frequency heating process for decontamination of soil. Proc. at 191 Meeting of the American Society on Solving Hazardous Waste Problems, 1986, pp. 332-339.
15. R. F. SCHIFFMANN: Microwave and dielectric drying in: *Handbook of industrial drying*. A.S. Mujumdar [Ed.], Marcel Dekker Inc., New York, pp. 327-356.
16. Z. KAWALA, T. ATAMAŃCZUK: Application of microwave heating for the remediation of soil contaminated with hydrocarbons and fuels. Proc. "Third International Symposium and Exhibition on Environmental Contamination in Central and Eastern Europe", Warsaw 1996, pp. 302-304.
17. Z. KAWALA, T. ATAMAŃCZUK: Microwave heating for remediation of soil contaminated with hazardous wastes and oils. Proc. "Analysis and Utilization of Oily Wastes", Gdańsk 1996, pp. 346-351.

On the Application of High-Frequency Electric Currents and Microwaves to the Cleanup of Soils from Petroleum Derivatives

The paper concentrates on three major items: it gives a review of in situ remediation methods using low- or high-frequency electric currents for heat transmission into the soil, presents examples of pilot-scale applications of 60 Hz current and radio-frequency radiation to soil cleanup, and discusses the results of laboratory investigations into the remediation of contaminated sand and soil. In the laboratory experiments, electric or electromagnetic energy was supplied to the soil through antennas or electrodes located at the contaminated place. The quantity of the energy absorbed by the soil depended strongly on the dielectric parameters of the aqueous medium, on the mineral components of the soil, and on the contaminants present there. Conversion of radiation or electricity into heat was concomitant with a rise in temperature. When power-line-frequency currents were applied, the process utilized the mechanism of the Joule effect and the principle of ohmic heating. When radiowaves and

microwaves were involved, the process followed the mechanism of dielectric heating – similar to the one occurring in microwave ovens. The rise in soil temperature resulted in the desorption or evaporation of organic contaminants into the soil air at a rate which depended on the temperature of the soil. Laboratory experiments substantiated the utility of microwave heating in the remediation of contaminated soil. Compared to other remediating methods, microwave heating runs at a very fast rate, yielding high removal of volatile and semi-volatile organics, especially polar contaminants. In the presence of water, the removal of polar and non-polar substances can be described in terms of the steam distillation principle. The cleanup process then runs under steady state conditions, at a temperature which does not exceed 100 °C. This is of particular importance to the cleanup of organic soils, because overly high temperature may burn the humic substances up.