Extracţia sub presiune redusă a unei "benzine" sintetice
Studii experimentale şi modelare matematică

GABRIELA-ALINA BRUSTUREAN[1]*, TEODOR TODINCA[1], DELIA PERJU[1], JEAN CARRÉ[2], CARMEN RUSNAC[1]

[1] Universitatea Politehnica Timişoara, Piaţa Victoriei, Nr. 2, 300006, Timişoara, România

[2] Université Claude Bernard Lyon 1, Laboratoire d'Application de la Chimie à l'Environnement (LACE), 43, boulevard du 11 novembre 1918, 69622 Villeurbanne Cedex, France

Soil vapor extraction (SVE) is an in situ depollution technology that removes the volatile organic compounds (VOCs) introduced into the unsaturated (vadoze) zone of the soil through various sources. The leakage of fuels (gasoline or gas oil), fuel oil and lubricants into soil due to deteriorating underground storage tanks, malfunction of process equipment and accidents of various kinds have become the most widespread contamination source. Therefore, the purpose of this paper is to investigate the removal of a synthetic multicomponent volatile organic compounds mixture that simulates a real fuel composition. The influence of the contaminants aging time and the process vacuum value on the extraction efficiency and depollution time has also been analyzes. The results show that extraction efficiency decrease with increasing of pollution aging time. The increasing of vacuum increases the extraction efficiency and decrease de depollution time. In order to determine and monitor the in-situ composition of the contaminant mixture during soil vapour extraction process, a simple analytical model is presented. In the set-up of the model was considered that the total mass of volatile organic compounds exists in four forms: as vapours, nonaqueous phase liquid (NAPL), in the soil solution and adsorbed to soil particles. In steady state, the partitioning between these phases was considered at equilibrium and it was described by physical laws (Henry law, Raoult law, ideal gas law). The dynamic behaviour of soil vapour extraction experiments proved a non-equilibrium behaviour, which was expressed in the model by using a transfer coefficient k_r. The accuracy of the model was tested by comparing the predicted results with the experimental data and by using the following performance criteria: standard deviation and correlation coefficient. The model performed relatively well, being capable to describe the studied soil vapour extraction process.

Keywords: soil vapour extraction, VOC, modelling

Extracţia sub presiune redusă (SVE) constituie o metodă fizică de tratare „*in situ*" a zonelor nesaturate din sol, poluate cu compuşi organici volatili (VOC) [1-3]. Această metodă a fost introdusă în anul 1984, devenind în decursul anilor una dintre cele mai utilizate tehnici de depoluare [4]. Principiul de funcţionare constă în a crea o depresiune în sol prin intermediul unor pompe de vid racordate la sonde sau puţuri de extracţie. Se creează astfel o circulaţie controlată a gazelor, poluanţii volatili prezenţi în zona nesaturată fiind antrenaţi de curentul generat de pompa de vid şi evacuaţi la suprafaţa solului. Înainte de a fi eliminat în atmosferă, fluxul de gaze este tratat în vederea recuperării sau distrugerii contaminanţilor [5,6].

Natura substanţelor poluante variază mult, fiind dependentă de sursa de poluare: urbană, industrială sau agricolă. Studiul poluărilor punctuale sau accidentale a demonstrat că, în 80-90 % din aceste cazuri, sursa de poluare o constituie hidrocarburile de origine petrolieră: carburanţii (benzine sau motorine), uleiurile de motor, lubrifianţii uzaţi [7]. Acestea constituie o importantă sursă de compuşi organici volatili, generând poluări punctuale, cu concentraţii ridicate.

Scopul acestei lucrări este de a studia procesul de depoluare prin extracţie sub presiune redusă a unui sol poluat cu un amestec sintetic de compuşi organici volatili, amestec ce simulează compoziţia unei benzine naturale. Determinările experimentale au urmărit influenţa unor parametrii caracteristici poluării (vârsta poluării), respectiv caracteristici echipamentului de extracţie (presiunea de depoluare) asupra eficienţei şi duratei de depoluare.

Pornind de la legile clasice ce descriu procesele fizice care guvernează distribuţia poluanţilor în sol, atât înainte cât şi în timpul depoluării, se dezvoltă un model matematic care permite: simularea datelor experimentale; - stabilirea gradului de repartiţie a poluanţilor între cele patru faze de existenţă în sol, în regim staţionar şi dinamic, şi evidenţierea competitivităţii de extracţie.

Partea experimentală

Instalaţia experimentală realizată pentru studiul depoluării prin extracţie sub presiune redusă a unor soluri poluate cu compuşi organici volatili este prezentată în figura 1 [8,9].

Probele de sol studiate au fost furnizate de liceul agricol Côte Saint André (Isère), Franţa, proprietăţile sale fiind următoarele: conţinut în materie organică - 2,2%; porozitate -52,2%; umiditate - 12%. De asemenea compoziţia sa granulometrică indică un sol bogat în nisip şi praf (43,2% - nisip; 39.8% - praf; 17% - argilă).

Drept poluant s-a utilizat un amestec sintetic, scopul fiind de a simula o poluare cu o benzină fără plumb. Alegerea compuşilor, cât şi proporţia lor în amestec au fost realizate pornind de la studiul compoziţiei unui carburant real. Astfel, s-au ales compuşi organici volatili, ce fac parte din două clase diferite de hidrocarburi: alcani şi hidrocarburi aromatice. În conformitate cu aceste consideraţii, în tabelul 1 sunt prezentate substanţele şi cantităţile ce formează amestecul tip „benzină".

Umplerea recipienţilor cilindrici şi realizarea poluării au fost efectuate astfel încât permeabilitatea, porozitatea solului cât şi poluarea să fie omogene. În acest fel s-a obţinut un grad de poluare în fază lichidă de 6g/kg sol.

* *email: alina.brustureanu@chim.upt.ro; Tel.: (+40) 256403065*

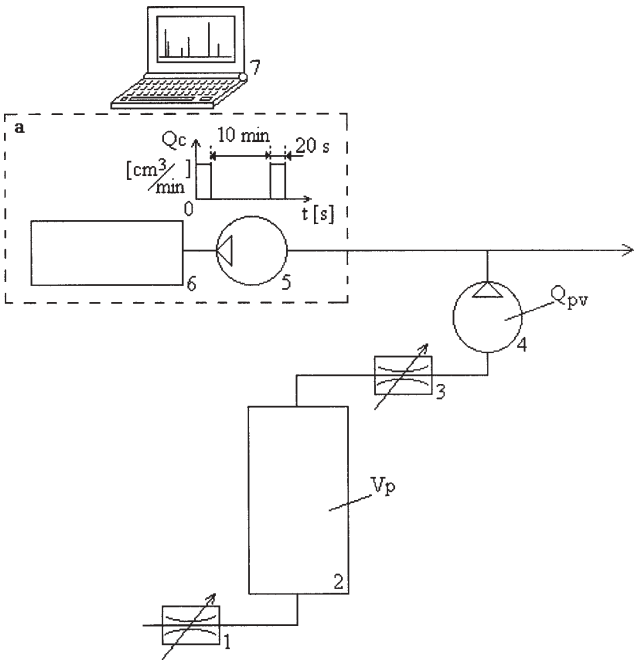

Fig. 1. Instalaţia experimentală de depoluare prin extracţie sub presiune redusă

Tabelul 1
COMPOZIŢIA AMESTECULUI TIP "BENZINĂ"

Poluant	Cantitate de poluant, [moli]	Fracţia molară
Toluen	0.0119	0.2
n-Heptan	0.0012	0.02
Etilbenzen	0.0121	0.2
m-Xilen	0.0189	0.31
p-Xilen	0.0040	0.07
Propilbenzen	0.0119	0.2
TOTAL	**0.06**	**1**

Recipienţii astfel pregătiţi au fost păstraţi timp de 9 zile pentru a permite realizarea echilibrului între cele patru faze de existenţă a unui poluant în sol: gazoasă, lichidă apoasă, „solidă" sorbită şi lichidă neapoasă. După această perioadă, recipienţii au fost inseraţi în montajul de depoluare prin extracţie sub presiune redusă, drept gaz de depoluare fiind utilizat aerul atmosferic.

Pentru a realiza circulaţia gazului de depoluare de-a lungul coloanei de sol (2), partea superioară a recipientului este conectată la o pompă de vid (4). Acest sistem provoacă circulaţia fluxului de aer, creând o uşoară depresiune în coloană. Depresiunea obţinută a fost măsurată într-un studiu paralel cu ajutorul unor detectoare de presiune montate în trei găuri filetate de pe suprafaţa laterală a recipienţilor.

Debitul gazului de depoluare a avut o valoare de 3600 $mL.min^{-1}$, valoarea sa fiind măsurată cu ajutorul unui debitmetru Platon montat la ieşirea din recipient.

În trecerea sa prin sol, fluxul de gaz se încarcă în vapori de poluant. Analiza compoziţiei acestui amestec gazos se realizează la ieşirea din coloana de sol cu ajutorul unui

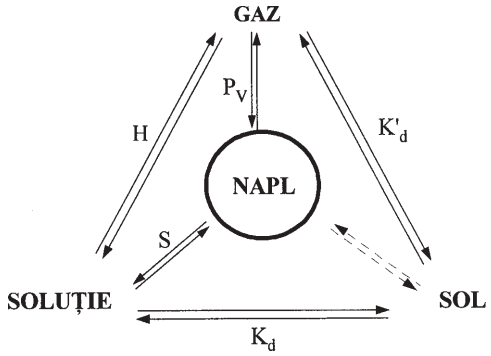

Fig. 2.Distribuţia poluanţilor la echilibru în zona nesaturată a solului

cromatograf (a); acesta aspiră periodic eşantioane gazoase prin intermediul unui robinet şi a unei pompe integrate (5). Informaţia furnizată de detectorul cromatografului (catarometru sau TCD) este trimisă către un calculator (7), care permite prelucrarea rezultatelor analizelor în timp real cu ajutorul limbajului de programare EZ-Chrom. Astfel se obţin valorile concentraţiei poluantului în fluxul gazos de depoluare la temperatura de lucru (C). Pentru a ţine cont de variaţia temperaturii la care s-a realizat procesul de depoluare, rezultatele sunt prezentate sub forma raportului C/C_{sat}, unde C_{sat} reprezintă concentraţia de saturaţie a compusului pur la aceeaşi temperatură.

Datorită cantităţii scăzute de poluant din coloana de sol, gazele care rezultă în urma depoluării sunt trimise direct către hota de evacuare, fără nici un tratament prealabil.

Elaborarea modelului matematic

Modelul matematic de transport al contaminaţilor, prezentat în această lucrare, a fost conceput pentru a descrie depoluările experimentale prin extracţie sub presiune redusă realizate în laborator. În regim staţionar, comportarea poluanţilor a fost asimilată cu o comportare la echilibru, iar în regim dinamic, această comportare a fost determinată ca fiind de neechilibru.

Ipotezele simplificatoare considerate în deducerea modelului au fost:

-comportare ideală a fazelor gazoasă, apoasă şi lichidă neapoasă din sol;

-valori constante ale temperaturii, umidităţii şi porozităţii solului în timpul procesului de depoluare;

-absenţa procesului de biodegradare a compuşilor organici poluanţi.

a. Comportarea poluanţilor în regim staţionar

În regim staţionar s-a considerat că cele patru faze de existenţă ale poluanţilor în sol (faza gazoasă, faza lichidă apoasă, faza „solidă" sorbită şi faza lichidă neapoasă - NAPL) se găsesc în echilibru la orice moment din timp. În figura 2 se prezintă schematic fazele de existenţă ale unui poluant precum şi echilibrele realizate între acestea [10].

Ecuaţia bilanţului de masă pentru un contaminant *i* are următoarea formă:

$$n_t^i = V^s \cdot C_t^i = y^i \cdot P \cdot \frac{\varepsilon_g \cdot V^s}{R \cdot T} + x^i \cdot \frac{\rho^s \cdot V^s \cdot \varphi}{M^w} + z^i \cdot n_o + x^i \cdot \frac{K_s^i \cdot \rho^s \cdot V^s}{M^w} \quad (1)$$

unde:

n_t^i – numărul total de moli de component *i* prezenţi în sol, [moli];

V^s – volumul elementului de sol considerat, [cm^3];

C_t^i - concentraţia molară globală aparentă a compusului *i* în sol, [$mol.cm^{-3}$];

y_t - fracţia molară a compusului *i* în faza gazoasă, [m];

P - presiunea totală din faza gazoasă;

ε_g – porozitatea solului, [%];
R – constanta gazelor ideale,[(atm.cm^3).(mol.K)$^{-1}$];
T - temperatura absolutã, [K];
x^i - fracþia molarã a compusului i în faza apoasã;
ρ^s – densitatea solului, [g.cm^{-3}];
φ – umiditatea solului, [$g_{apã}.g_{sol}^{-1}$];
M^w - masa molarã a apei, [g.mol^{-1}];
z^i – fracþia molarã a compusului i în faza organicã liberã;
n_o - numãrul total de moli de compuºi organici în faza organicã liberã, [moli];
K^i_s - coeficientul de repartiþie între faza lichidã apoasã ºi sol.

Această ecuaþie conþine patru necunoscute: x_i, y_i, z_i ºi n_o. Pentru a reduce numãrul de necunoscute, se folosesc legile lui Raoult ºi cea a lui Henry care descriu repartiþia poluanþilor între faza lichidã neapoasã ºi cea gazoazã, respectiv între faza apoasã ºi cea gazoasã a solului. În consecinþã, ecuaþia (1) devine:

$$V^s \cdot C_t^i = z^i \cdot (P_v^i \cdot \frac{\varepsilon_g \cdot V^s}{R \cdot T} + S_w^i \cdot \frac{\rho^s \cdot V^s \cdot \varphi}{M^w} + n_o + S_w^i \cdot \frac{K_s^i \cdot \rho^s \cdot V^s}{M^w}) \quad (2)$$

unde:
S^i_w este solubilitatea compusului i în apã (moli compus i . moli apã$^{-1}$);
P^i_w - presiunea de vapori saturaþi ai compusului i, [atm].

Numãrul necunoscutelor se reduce la douã: z_i ºi n_o. Pentru a afla valoarea acestor douã necunoscute este nevoie de încã o ecuaþie. Datoritã existenþei fazei organice lichide, suma fracþiilor molare de poluanþi din această fazã este întotdeauna egalã cu 1.

$$\sum_{i=1}^{N} z^i = 1 \quad (3)$$

unde:
N - numãrul total de poluanþi organici prezenþi în sol.

În concluzie, în regim staþionar, repartiþia unui poluant i în cele 4 faze de existenþã în sol poate fi exprimatã prin urmãtorul sistem de (i+1) ecuaþii:

$$\begin{cases} V^s \cdot C_t^i = z^i \cdot (P_v^i \cdot \frac{\varepsilon_g \cdot V^s}{R \cdot T} + S_w^i \cdot \frac{\rho^s \cdot V^s \cdot \varphi}{M^w} + n_o + S_w^i \cdot \frac{K_s^i \cdot \rho^s \cdot V^s}{M^w}) \\ \sum_{i=1}^{N} z^i = 1 \end{cases} \quad (4)$$

b. Comportarea poluanþilor în regim dinamic

În ceea ce priveºte comportarea dinamicã a coloanei de sol, în urma unui studiu hidrodinamic s-a stabilit cã aceasta poate fi asimilatã cu o conectare în serie a douã reactoare cu agitare perfectã de volume V_1, respectiv V_2 [11].

Având în vedere debitul de depoluare - 3600 [ml.min^{-1}], echilibru între fazele de existenþã ale unei poluãri în sol nu se mai atinge. Această situaþie apare datoritã unui proces de rezistenþã la transfer a poluanþilor din faza organicã cãtre fluxul de depoluare gazos.

În model, această situaþie de neechilibru a fost descrisã prin introducerea unui coeficient de transfer k_r. Ecuaþiile ce caracterizează bilanþul masic al acestui sistem sunt:

$$\begin{cases} \beta_g \cdot \varepsilon_g \cdot V_1 \cdot \frac{dy_1^i(t)}{dt} = -F \cdot y_1^i(t) + V_1 \cdot k_r \cdot [y_{e,1}^i(t) - y_1^i(t)] \\ \beta_g \cdot \varepsilon_g \cdot V_2 \cdot \frac{dy_2^i(t)}{dt} = F \cdot [y_1^i(t) - y_2^i(t)] + V_2 \cdot k_r \cdot [y_{e,2}^i(t) - y_2^i(t)] \end{cases} \quad (5)$$

unde:
β_g este reţenţia în fazã gazoasã, [mol.cm^{-3}];
V_1, V_2 – volumul primului, respectiv celui de-al doilea reactor, [cm^3];
$\frac{dy_1^i(t)}{dt}$, $\frac{dy_2^i(t)}{dt}$ - variaţia în timp a fracţiei molare gazoase a poluantului i în prima, respectiv a doua secţiune, [s^{-1}];
F – debitul molar de gaz de depoluare, [mole.h^{-1}];
k_r - coeficient de transfer între sol ºi fluxul gazos, [mol.cm^{-3}.h^{-1}];
$y^i_{e,1}(t)$, $y^i_{e,2}(t)$ - variaţia în timp a fracţiei molare la echilibru a poluantului i în fazã gazoasã, pentru primul, respectiv al doilea reactor;
$y^i_1(t)$, $y^i_2(t)$- variaţia în timp a fracţiei molare a poluantului i în fazã gazoasã, pentru primul, respectiv al doilea reactor.

Valorile coeficienţilor de transfer au fost determinate pe baza raportului între valorile presiunii de vapori saturaţi ai fiecãrui compus chimic din amestecul studiat ºi presiunea de vapori saturaţi a compusului celui mai volatil - heptanul. Cu cât compusul este mai volatil, cu atât coeficientul sãu de transfer în fluxul gazos este mai mare. Valorile obţinute sunt prezentate în tabelul 2.

Rezolvarea sistemelor de ecuaţii obţinute s-a realizat prin utilizarea metodelor numerice, respectiv a metodei iterative Newton - Raphson ºi a metodei Euler. Drept indicatori ai adecvanţei modelului au fost folosiţi: deviaţia standard (σ), indicatorul preciziei modelului (R^2) ºi coeficientul de corelaţie (R) [12,13].

Rezultate ºi discuţii

a. Testarea montajului experimental

Primele determinări experimentale efectuate, au urmãrit testarea montajului experimental. În acest sens, doi recipienţi cu sol (nr. 1 ºi nr. 2) au fost poluaţi ºi depoluaţi în condiţii identice. Evoluţia concentraţiei poluanţilor în fluxul de depoluare în funcţie de timp, pentru cele douã experienţe studiate, este prezentatã în figura 3.

Tabelul 2
VALORILE COEFICIENŢILOR DE TRANSFER k_r

Produs	Presiunea de vapori saturaţi la 19.5°C, [Pa]	P_{produs} / P_{heptan}	Coeficient de transfer, k_r
n-Heptan	4417.8	1.00	$4.5000 \cdot 10^{-2}$
Toluen	2836.7	0.64	$2.8846 \cdot 10^{-2}$
Etilbenzen	932.84	0.21	$9.4937 \cdot 10^{-3}$
p-Xilen	851.99	0.19	$8.6705 \cdot 10^{-3}$
m-Xilen	815.42	0.18	$8.3026 \cdot 10^{-3}$
Propilbenzen	436.6	0.10	$4.4466 \cdot 10^{-3}$

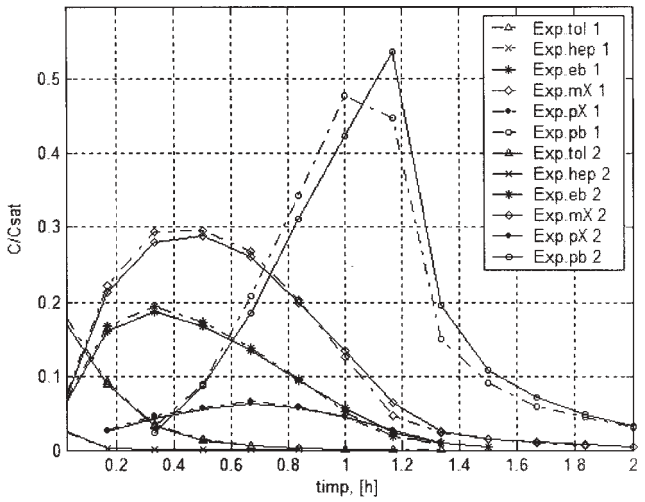

Fig. 3.Testarea montajului experimental de depoluare prin extracţie sub presiune redusă

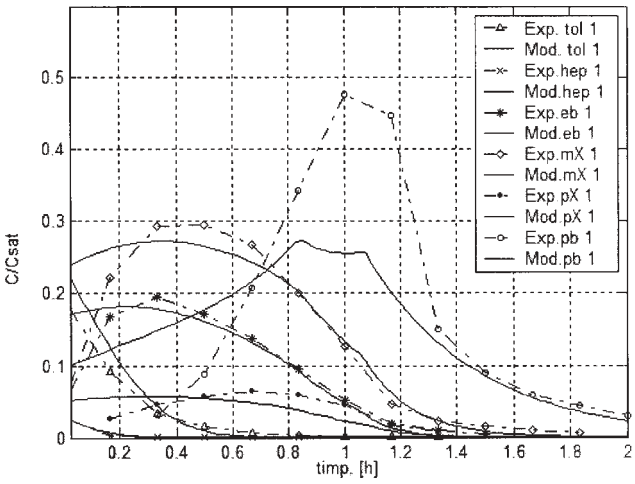

Fig. 4.Testarea modelului matematic

Cantităţile de poluanţi existente în sol, la începutul poluării (m_i), cele extrase în urma aplicării tratamentului de depoluare (m_e), precum şi randamentele de depoluare (η) sunt prezentate în tabelul 3.

Analiza reprezentărilor grafice din figura 3 a fost efectuată ţinând cont de fracţia molară a fiecărui produs în amestecul utilizat: toluen/ n-heptan/ etilbenzen/ m-xilen/ p-xilen/ propilbenzen = 0,20: 0,02: 0,20: 0,31: 0,07: 0,20.

Ordinea de antrenare a compuşilor în fluxul gazos se face în conformitate cu presiunea lor de vapori saturaţi. Astfel, prima dată este antrenat *n*-heptanul, urmat de toluen şi apoi de etilbenzen, *m*-xilen şi *p*-xilen, ultimii trei având presiuni de vapori saturanţi foarte apropiate una de alta. Ultimul produs depoluat este propilbenzenul, compusul cel mai puţin volatil din amestecul studiat.

Analiza comparativă a rezultatelor obţinute pentru cele două experienţe demonstrează o reproductibilitate bună a rezultatelor, validând astfel montajul experimental realizat.

b. Testarea modelului matematic

Testarea modelului matematic a fost realizată prin compararea rezultatelor simulării cu cele obţinute experimental în urma depoluării coloanei de sol din recipientul nr. 1. Rezultatele depoluării experimentale

Tabelul 3

PARAMETRII DE DEPOLUARE PENTRU EXPERIENŢELE 1 şI 2

Poluant	Experienţa 1			Experienţa 2		
	m_i, [g]	m_e, [g]	η	m_i, [g]	m_e, [g]	η
Toluen	1.1131	0.9681	0.87	1.1171	0.9139	0.82
n-Heptan	0.1223	0.1277	1.04	0.1166	0.1286	1.10
Etilbenzen	1.3194	1.2886	0.97	1.3297	1.2626	0.95
m-Xilen	2.0616	1.9719	0.96	2.0776	1.9559	0.94
p-Xilen	0.4283	0.4106	0.96	0.4316	0.4110	0.95
Propilbenzen	1.4209	1.3391	0.94	1.4215	1.3690	0.96

Tabelul 4

PARAMETRII DE DEPOLUARE şI INDICATORII DE ADECVANŢĂ AI MODELULUI PENTRU EXPERIENŢA 1

	Poluant	Temp. [°C]	Timp staţionare, [zile]	Presiune de lucru, [Pa]	m_i, [g]	m_e, [g]	η	σ	R^2	R
Experienţa 1	Toluen	19.60	9	$0.6316 \cdot 10^5$	1.1131	0.9681	0.87	0.0363	2.3184	0.8300
	n-Heptan				0.1223	0.1277	1.04	0.0023	1.2693	0.9789
	Etilbenzen				1.3194	1.2886	0.97	0.0090	0.9956	0.9921
	m-Xilen				2.0616	1.9719	0.96	0.0190	0.9405	0.9866
	p-Xilen				0.4283	0.4106	0.96	0.0178	1.1722	0.5134
	Propilbenzen				1.4209	1.3391	0.94	0.1178	0.3133	0.7129

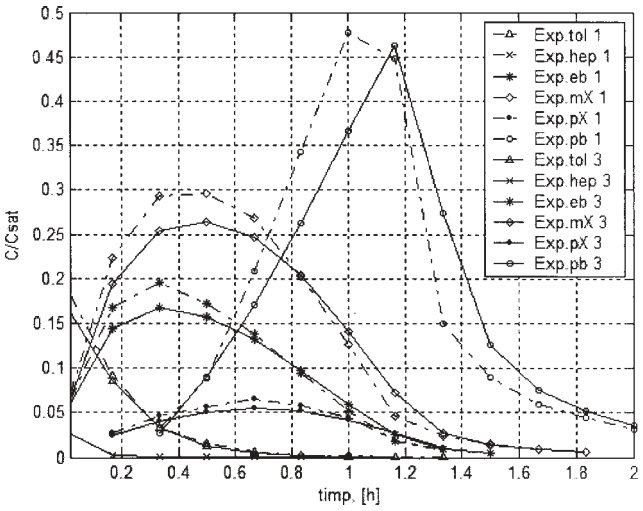

Fig. 5.Influenþa timpului de staþionare a contaminaþilor în sol asupra procesului de depoluare prin extracþie sub presiune redusã

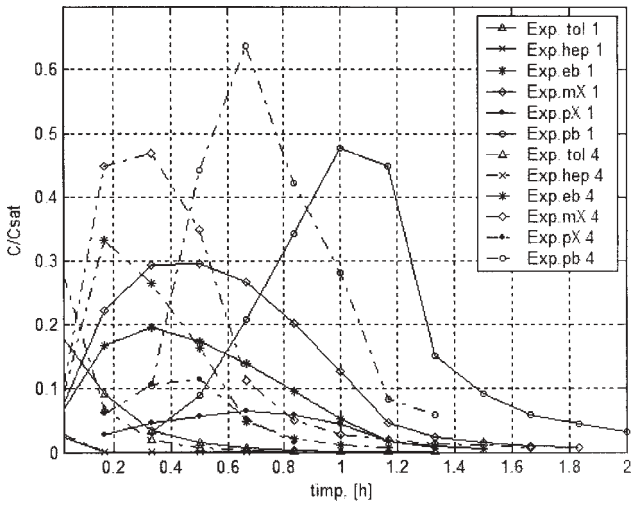

Fig. 6. Influenþa presiunii de lucru asupra procesului de depoluare prin extracþie sub presiune redusã

Tabelul 5

PARAMETRII DE DEPOLUARE PENTRU EXPERIENÞELE 1 ªI 3

Poluant	Experienţa 1				Experienţa 3			
	Timp staţionare, [zile]	m_i, [g]	m_e, [g]	η	Timp staţionare, [zile]	m_i, [g]	m_e, [g]	η
Toluen	9	1.1131	0.9681	0.87	30	1.0996	0.8955	0.81
n-Heptan		0.1223	0.1277	1.04		0.1250	0.1325	1.06
Etilbenzen		1.3194	1.2886	0.97		1.3212	1.2369	0.93
m-Xilen		2.0616	1.9719	0.96		2.0644	1.9128	0.92
p-Xilen		0.4283	0.4106	0.96		0.4289	0.3901	0.90
Propilbenzen		1.4209	1.3391	0.94		1.4415	1.3490	0.93

precum ºi cele obþinute în urma aplicãrii modelului matematic sunt prezentate în figura 4, sub forma evoluþiei raportului C/Csat în funcþie de timp.

Parametrii de depoluare ºi indicatorii de adecvanþã ai modelului sunt prezentaþi în tabelul 4.

Comparând rezultatele simulãrii cu cele experimentale se observã o concordanþã relativ buna între model ºi realitate. Acest lucru este confirmat ºi de valorile indicatorilor de adecvanþã.

c. Influenþa timpului de staþionare a contaminaþilor în sol asupra procesului de depoluare

Pentru a studia influenþa timpului de staþionare a poluanþilor în sol, un al treilea recipient cu sol (nr. 3) a fost poluat în condiþii identice cu primul recipient (nr. 1). Spre deosebire de primul recipient poluat, care a fost pãstrat 9

Tabelul 6

PARAMETRII DE DEPOLUARE PENTRU EXPERIENÞELE 1 ªI 4

Poluant	Experienţa 1				Experienţa 4			
	Presiune de lucru, [Pa]	m_i, [g]	m_e, [g]	η	Presiune de lucru, [Pa]	m_i, [g]	m_e, [g]	η
Toluen	$0.6316 \cdot 10^5$	1.1131	0.9681	0.87	$0.3032 \cdot 10^5$	1.0979	1.0009	0.91
n-Heptan		0.1223	0.1277	1.04		0.1217	0.1278	1.05
Etilbenzen		1.3194	1.2886	0.97		1.3106	1.2938	0.99
m-Xilen		2.0616	1.9719	0.96		2.0477	1.9903	0.97
p-Xilen		0.4283	0.4106	0.96		0.4254	0.4198	0.99
Propilbenzen		1.4209	1.3391	0.94		1.4090	1.3580	0.97

zile înainte de a fi supus depoluării, cel de-al treilea a fost păstrat 30 de zile.

Curbele de depoluare obținute pentru cele două situații sunt prezentate comparativ în figura 5, iar parametrii de depoluare în tabelul 5.

Din figură se constată că, o variație a timpilor de staționare a poluanților în sol de acest ordin de mărime (9, respectiv 30 zile) conduce la o variație foarte mică a poziției curbelor de depoluare. Astfel, randamentul de depoluare a solului în care poluantul a staționat 9 zile (experiența nr. 1) este mai mare decât a celui în care poluantul a staționat 30 zile (experiența nr. 3).

d. Influența presiunii de lucru asupra procesului de depoluare

Un alt efect studiat a fost influența presiunii de lucru asupra procesului de depoluare. Pentru aceasta, s-a realizat poluarea coloanei de sol nr. 4 în condiții identice cu coloana nr. 1. După o perioadă de staționare a poluantului în sol de 9 zile, cele două coloane au fost supuse depoluării prin extracție sub presiune redusă, presiunile de lucru fiind de $0,6316.10^5$ Pa pentru coloana 1 și respectiv de $0,3032.10^5$ Pa pentru coloana 4.

Curbele de depoluare obținute pentru cele două situații sunt prezentate comparativ în figura 6, iar parametrii de depoluare în tabelul 6.

Rezultatele obținute demonstrează că scăderea presiunii absolute de extracție conduce la o depoluare mai rapidă și în același timp la un randament mai bun.

Concluzii

Extracția sub presiune redusă poate constitui o metodă de depoluare aplicabilă prezentând următoarele avantaje:

-limitează extinderea poluării;

-reduce concentrația compușilor contaminanți chiar atunci când acești sunt localizați la adâncimi mari;

-realizează depoluarea zonei contaminante fără a afecta activitatea specifică „*site-ului*”;

-prezintă un preț de depoluare mult mai scăzut comparativ cu celelalte tehnici curative.

Utilizarea din ce în ce mai frecventă a acestei tehnici a condus la necesitatea de a descrie cât mai precis fenomenele care au loc în sol înainte și în timpul procesului de depoluare.

În acest context, lucrarea de față prezintă un model matematic care permite stabilirea gradului de repartiție a poluanților între cele patru faze de existență în sol, în regim staționar și dinamic, și evidențierea competitivității de extracție a acestora. Testarea modelului matematic s-a realizat prin compararea rezultatelor obținute în urma aplicării modelului cu cele experimentale, și prin calculul indicatorilor de adecvanță ai modelului (σ, R, R^2). Ambele modalități de verificare dovedesc că modelul matematic analitic elaborat este suficient de precis pentru a descrie procesul de depoluare a solului prin extracție sub presiune redusă realizat la scară de laborator.

Rezultatele experimentale prezentate în lucrare evidențiază influența timpului de staționare al contaminanților în sol și a presiunii de lucru asupra eficienței procesului de depoluare prin extracție sub presiune redusă. Astfel, se constată că randamentul de depoluare scade cu creșterea timpului de staționare al poluanților în sol. Scăderea presiunii de lucru (creșterea vidului) conduce la o creștere a randamentului de depoluare însoțită de scăderea duratei procesului de extracție.

Bibliografie

1.LECOMTE, P., Les sites pollués. traitement des sols et des eaux souterraines. 2e ed.. Technique et Documentation: Paris, 1998, 204 pag.

2.RADULESCU, H., Poluare si tehnici de depoluare a mediului. Eurobit: Timisoara, 2001, 203 pag.

3.DESTRIBATS, J.M., PREZ, E., SOYEZ, B., La dépollution des sols en place. Techniques et examples. Etudes et recherches. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées : Paris, 1994, 120 pag.

4.STYLIANOU, C., DEVANTIER, B.A., J. Environ. Eng., **121**, n°4, 1995, 337 pag.

5.ANDERSON, C.W., Innovative site remediation technology vol.8 : Vacuum vapor extraction. Springer Verlag: Berlin, 1994, 224 pag

6.NEAG, GH., Depoluarea solurilor și apelor subterane. Casa Cartii de Stiinta: Cluj-Napoca, 1997, 226 pag

7.DEMANZE, C., L'état de la normalisation concernant l'analyse de sols contaminés. Comm. Séminaire : Prévenir et gérer les risques industriels. La décontamination des sols pollués. Responsabilités juridiques et techniques de dépollution. Palais des Congés. Paris, 17-18 juin, 1992

8.BRUSTUREAN, G.A., CARRE, J., PERJU, D., BOURGOIS J., Déchets. Sciences & Techniques, **37**, 2005, p.4

9.BRUSTUREAN, G. A., Dépollution des sols par venting et extraction sous pression réduite: étude expérimentale. modélisation et simulation numérique. Thèse sci. : INSA de Lyon, n° d'ordre : 04 ISAL0075, 2004, 249 pag

10.MALINA, G., GROTENHUIS, J.T.C., RULKENS, W.H., MOUS, S.L.J., DE WITT, J.C.M., Environ. Technol., **9**, nr. 10, 1998, p.977

11.BRUSTUREAN, G.A., PERJU, D., CARRE, J., DUMITREL, D., Chem. Bull. "Politehnica" Univ. Timișoara, **49**, 2004, p. 144

12.TODINCA, T., GEANTA, M., Modelarea si simularea proceselor chimice. Aplicatii în MATLAB. Politehnica: Timisoara, 1999, p. 24

13.PENNY J., LINDFIELD, G., Numerical methods using MATLAB. Cornwall. Bodmin: Hartnolls Limited, 1995, p. 40

Intrat în redacție: 28.05.2007