

Zdzisław Kawala, Paweł Dakiniewicz, Hanna Czerniak, Michał Araszekiewicz

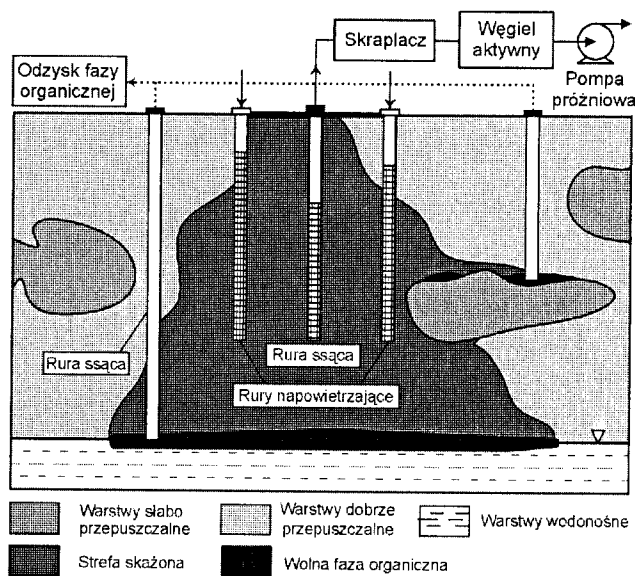
Symulacja rozkładów ciśnień i prędkości przepływu powietrza w procesie desorpcji próżniowej zanieczyszczeń z gruntu

Zanieczyszczenie gruntów i wód podziemnych związkami ropopochodnymi i rozpuszczalnikami organicznymi jest problemem szczególnie dotyczącym państwa najbardziej rozwinięte gospodarczo. Paliwa i rozpuszczalniki organiczne składają się przede wszystkim ze związków o względnie niewielkiej rozpuszczalności w wodzie i wysokiej prężności par. Gdy nastąpi ich wyciek do gruntu (np. ze zbiorników lub rurociągów, podczas katastrof transportowych itp.) przesączają się one wolno poprzez strefę nienasyconą (tzw. strefa aeracji) w postaci odrębnej fazy organicznej (*non-aqueous phase liquid* – NAPL), następnie częściowo zatrzymywane są w porach gruntu (tzw. stężenie rezydualne), aż osiągną zwierciadło wód gruntowych. Takie plamy zanieczyszczeń stają się długotrwałym źródłem toksycznych związków organicznych, powodujących zanieczyszczenie zarówno warstwy gruntu, jak i wód podziemnych. Stąd też odnowa gruntów powinna uwzględniać w pierwszej kolejności zanieczyszczenia strefy nienasyconej [1].

Wśród technologii oczyszczania gruntów koncentrujących się na usuwaniu zanieczyszczeń ze strefy nienasyconej wyróżniają się metody polegające na ich odparowaniu lub desorpcji pod wpływem obniżonego ciśnienia. Klasyycznym przykładem takich rozwiązań jest metoda desorpcji próżniowej zanieczyszczeń z gruntu, w literaturze anglojęzycznej zwana usuwaniem przez przedmuchiwanie powietrzem (*air stripping*) lub ekstrakcją par z gleby (*soil vapor extraction* – SVE).

Podstawowa zasada metody desorpcji próżniowej polega na tym, że za pomocą systemu studni odsysających (perforowanych rur umieszczonych w gruncie) ze skażonego obszaru usuwane jest powietrze gruntowe, nasycone lotnymi składnikami zanieczyszczeń, a w jego miejsce dopływa czyste powietrze atmosferyczne, do którego odparowują pozostałe w złożu substancje (rys.1). Prowadząc proces w sposób ciągły, przez odpowiednio długi czas, możliwe jest całkowite usunięcie zanieczyszczeń z gruntu, co potwierdzone zostało nie tylko w badaniach eksperymentalnych przeprowadzonych w różnej skali, ale także w trakcie konkretnych, przemysłowych operacji odnowy terenów w różnych częściach świata [2–4]. Usuwane z gruntu powietrze jest oczyszczane w instalacjach znajdujących się na powierzchni. W praktyce stosuje się najczęściej adsorpcję na węglu aktywnym, spalanie lub utlenianie katalityczne [2].

Podczas procesu desorpcji próżniowej zanieczyszczeń z gruntu występuje stały przepływ powietrza przez jego skażone obszary pod wpływem gradientów ciśnień wywołanych



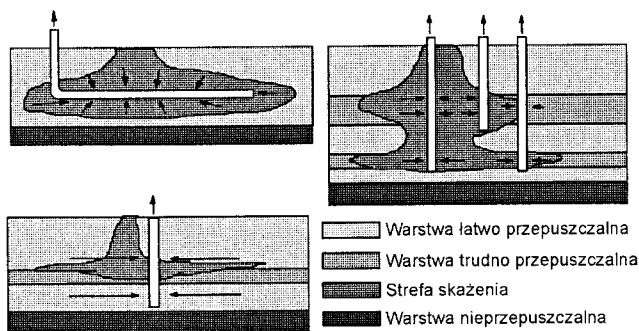
Rys. 1. Schemat układu do desorpcji próżniowej zanieczyszczeń z gruntu

pompami próżniowymi, podłączonymi do studni odsysających umieszczonych w jego głębi. Od sposobu i rodzaju przepływu powietrza w głównej mierze zależy efektywność całego procesu. Dlatego niezwykle istotnym zagadnieniem jest dobre oszacowanie rozkładów ciśnień powietrza w otoczeniu studni odsysających powietrze i związanych z tym warunków przepływu powietrza gruntowego, jeszcze przed rozpoczęciem operacji. Znacznie ułatwia to dobór całej instalacji, a więc pozwala na ustalenie jej podstawowych parametrów, tj. [5]:

- niezbędnej liczby oraz zasięgu oddziaływania studni odsysających i wtłaczających powietrze, ich rozmiarów i sposobu rozmieszczenia,
- długości odcinków perforowanych rur (filtrów) oraz głębokości, na jakiej powinny się one znajdować,
- rodzaju i wydajności urządzeń wytwarzających podciśnienie oraz warunków ich pracy (przede wszystkim podciśnienie w rurach odsysających),
- natężenia i prędkości przepływu odsysanego powietrza gruntowego,
- powierzchni obszaru, który powinien zostać pokryty warstwą nieprzepuszczalną, w celu wydłużenia zasięgu oddziaływania rur odsysających.

W dotychczasowej praktyce aparaturę wykorzystywaną w procesie desorpcji próżniowej projektowano przede wszystkim w oparciu o wyniki doświadczeń nabytych w trakcie wcześniejszych operacji remediacyjnych, a także wyniki testów polowych [6]. Jednak na przestrzeni kilku ostatnich lat,

wraz z rozwojem informatyki, podejmowane są próby usprawnienia procesu projektowania poprzez wykorzystanie matematycznego modelowania procesu [7,8]. Nie jest to zagadnienie proste, gdyż rzeczywiste ośrodki gruntowe mają bardzo złożoną strukturę, przez co równania opisujące zachodzące w nich zjawiska transportu charakteryzują się dużym stopniem komplikacji. W takich przypadkach ich rozwiązywanie umożliwiają metody numeryczne. Obecnie dostępnych jest kilka programów komputerowych (np. AIRFLOW, AIR3D, VENT2D), które pozwalają określić zachowanie się powietrza w gruncie, nawet dla bardzo złożonych układów rzeczywistych (rys.2).



Rys. 2. Przykładowe sposoby doboru geometrii układu studni odsysających w zależności od położenia skażonych stref i hydrogeologii gruntu

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki symulacji komputerowych przeprowadzonych z wykorzystaniem programu symulacyjnego AIR3D. Za jego pomocą sprawdzono wpływ przepuszczalności gruntu na parametry konstrukcyjne systemów desorpcji próżniowej składających się z kilku studni odsysających powietrze.

Opis matematyczny przepływu powietrza w strefie oddziaływania studni odsysającej

W strefie oddziaływania rur ssących, w których zastosowano odpowiednie podciśnienie, następuje ruch powietrza gruntowego w kierunku perforowanych odcinków studni odsysających. Ogólne równanie przepływu powietrza w nienasyconym ośrodku porowatym (równanie ciągłości) wynika z zasady zachowania masy i ma postać:

$$\nabla(\rho v) = -\Theta \frac{\partial \rho}{\partial t} + W\rho \quad (1)$$

w której:

ρ – gęstość powietrza, kg/m³

Θ – ułamek objętości porów zajęty przez powietrze,–

v – prędkość przepływu powietrza, m/s

W – człon źródłowy, 1/s

t – czas, s

Zależność przepływu powietrza zawierającego opary zanieczyszczeń przez warstwę gruntu na skutek różnicy ciśnień może być opisana równaniem Darcy (równanie ruchu). Do opisu przepływu gazów w ośrodkach porowatych przyjmuje ono postać:

$$v = \frac{k}{\mu} \nabla(P + \rho g) \quad (2)$$

w której:

k – tensor współczynnika przepuszczalności, m²

μ – współczynnik lepkości dynamicznej powietrza, kg/m·s

P – ciśnienie powietrza, Pa

g – przyspieszenie ziemskie, m/s²

W wypadku przepływu powietrza przez ośrodek porowaty prawo Darcy jest szeroko stosowaną, przybliżoną, wersją zasady zachowania pędu. Jest ono poprawne jednak tylko dla bardzo małych przepływów ($Re < 6$) [9,10].

W matematycznym opisie przepływu powietrza przez ośrodek porowaty w trakcie procesu desorpcji próżniowej można założyć, iż zależność gęstości gazu od jego ciśnienia spełnia równanie gazu doskonałego:

$$\rho = \frac{MP}{RT} \quad (3)$$

w którym:

M – średnia masa molowa powietrza, kg/mol

R – stała gazowa równa 8,314 J/mol·K

T – temperatura, K

Po rozwinięciu równań (1) i (2) we współrzędnych kartezjańskich otrzymuje się odpowiednio równania (4) i (5), a po podstawieniu równania (5) do równania (4) otrzymuje się równanie (6):

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = -\Theta \frac{\partial \rho}{\partial t} + W\rho \quad (4)$$

$$v = v_x + v_y + v_z = \frac{-k_x}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{-k_y}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{-k_z}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \frac{-k_x}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \frac{-k_y}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho \frac{-k_z}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \right) = -\Theta \frac{\partial \rho}{\partial t} + W\rho \quad (6)$$

w którym:

k_x, k_y, k_z – składowe diagonalne tensora przepuszczalności, m²

Podstawiając w miejsce ρ wyrażenie (3), przy założeniu, że przepływ jest izotermiczny ($\partial T/\partial t = 0, T = \text{const.}$) oraz stosując dalsze przekształcenia różniczkowe, otrzymuje się następujące równanie:

$$k_x \frac{\partial^2 P^2}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 P^2}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 P^2}{\partial z^2} = \frac{\Theta \mu}{P} \frac{\partial^2 P^2}{\partial t} - 2W\mu P \quad (7)$$

Stosując w celu linearyzacji równania (7) podstawienie $P^2 = \Phi$, otrzymuje się ostateczną postać równania przepływu gazu przez ośrodek porowaty:

$$k_x \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = \frac{\Theta \mu}{\sqrt{\Phi}} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t} - 2W\mu \sqrt{\Phi} \quad (8)$$

Do określenia rozkładów ciśnień powietrza przepływającego przez badany obszar w określonym momencie czasu stosuje się założenie $\sqrt{\Phi} = P_{\text{atm}}$ i wówczas równanie (8) przybiera postać liniową. W wyniku jego rozwiązania, przy założeniu odpowiednich warunków brzegowych i po powrocie do początkowych zmiennych, uzyskuje się pole ciśnień powietrza w zadanej strefie gruntu. Dla nieskomplikowanych geometrii układów desorpcji próżniowej istnieją rozwiązania analityczne [10,11]. W wypadku układów rzeczywistych najlepszym podejściem jest jednak zastosowanie metod numerycznych.

Program symulujący przepływ powietrza w gruncie

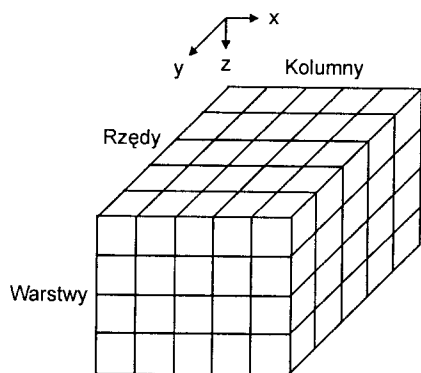
Do komputerowego symulowania przepływu powietrza przez zanieczyszczony grunt w trakcie procesu desorpcji próżniowej opracowanych zostało kilka programów komputerowych, opartych na analitycznych i numerycznych rozwiązaniach tego zagadnienia. Jednym z nich jest program AIR3D [12],

który wykorzystuje zlinearyzowane równanie rozkładu ciśnienia powietrza w gruncie (8), które rozwiązywane jest metodą różnic skończonych. Ze względu na ściśliwość powietrza (opisaną równaniem gazu doskonałego) program AIR3D generuje rozkłady ciśnień i składowych wektora prędkości przepływu powietrza w dwu- lub trójwymiarowym obszarze, a także rozkłady masowych i objętościowych natężeń przepływu powietrza w badanym ośrodku. Dane wyjściowe, które może zdefiniować użytkownik oraz dane wynikowe zawiera tabela 1.

Tabela 1. Dane wyjściowe i wynikowe do modelu AIR3D

| Dane wyjściowe | Wielkości wynikowe |
|---|---|
| Parametry aparatury: – ilość, umiejscowienie rur odsysających – ciśnienie w rurze odsysającej – długość i położenie perforowanych odcinków rury – średnica rur odsysających | Rozkłady ciśnień powietrza gruntowego |
| Właściwości ośrodka: – ilość i położenie warstw geologicznych – współczynniki przepuszczalności warstw w kierunku poziomym – współczynnik anizotropii (k_x/k_z) – porowatość gruntu – temperatura gruntu | Składowe wektora prędkości przepływu powietrza gruntowego |
| Wielkości obliczeniowe: – warunki brzegowe – parametry siatki różnic skończonych | Bilanse masowe dla każdej komórki ośrodka |

W celu przeprowadzenia symulacji komputerowej przepływu powietrza w gruncie przy użyciu programu AIR3D należy na wstępie zdefiniować ośrodek modelowy, który będzie obrazował wybrany fragment zanieczyszczonego gruntu. W tym celu program wymaga podania wymiarów ośrodka oraz sposobu jego podziału na pojedyncze, trójwymiarowe komórki (rys.3). Najlepszym rozwiązaniem jest taki dobór ośrodka modelowego, aby największe zagęszczenie komórek przypadało na najbliższe otoczenie rur odsysających.



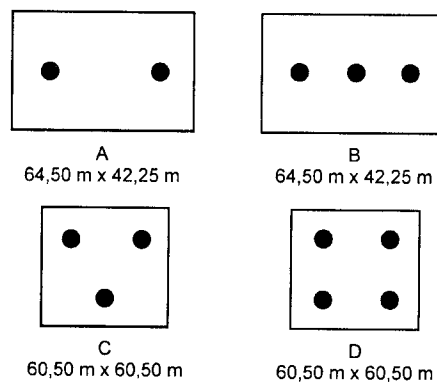
Rys. 3. Schemat trójwymiarowego ośrodka modelowego

W celu określenia zależności pomiędzy liczbą studni w ośrodku modelowym i wartościami natężenia przepływu powietrza, przeprowadzono symulacje dla układów dwóch, trzech i czterech rur odsysających przyjmując, iż warstwa gruntu ma jednakową przepuszczalność we wszystkich kierunkach. Parametry gruntu oraz umieszczonych w nich rur zawiera tabela 2.

Ośrodki modelowe wykorzystane w symulacjach, oznaczone kolejnymi literami alfabetu (A, B, C i D), przedstawiono schematycznie na rysunku 4 w postaci widoku z góry, który obrazuje sposób umiejscowienia w nich rur ssących. Pod schematami podano rozmiary przekrojów poprzecznych ośrodków modelowych. Symbole przypisane każdemu ośrodkowi będą używane dalej w tekście, w celu ich łatwiejszego rozróżnienia.

Tabela 2. Parametry definiujące ośrodek modelowy

| Parametr, jednostka | Wartość |
|---|--------------------|
| Liczba rur ssących, – | 2, 3, 4 |
| Średnica rur ssących, m | 0,25 |
| Długość odcinka perforowanego, m | 1, 0 |
| Głębokość posadowienia filtru, m | 8+9 |
| Ciśnienie wewnątrz rur ssących, atm | 0,9 |
| Liczba warstw geologicznych, – | 1 |
| Grubość warstwy geologicznej, m | 10 |
| Współczynnik przepuszczalności w kierunku x i y (k_{xy}), m | $1 \cdot 10^{-11}$ |
| Współczynnik przepuszczalności w kierunku z (k_z), m | $1 \cdot 10^{-11}$ |
| Porowatość złoże, – | 0,3 |
| Temperatura złoże, °C | 10 |



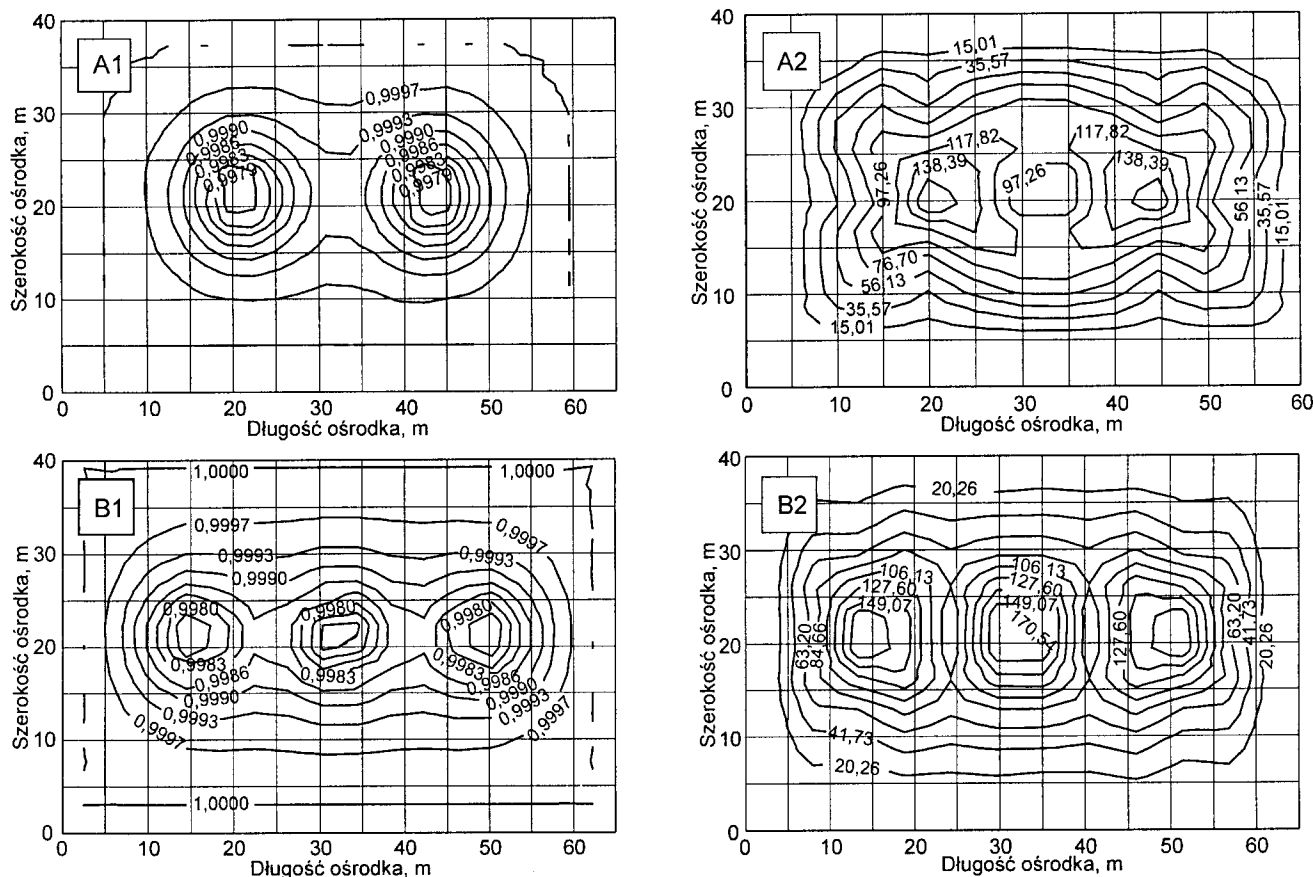
Rys. 4. Rzut z góry na modelowe ośrodki wykorzystane w symulacjach

W symulacjach założono, że ośrodki modelowe od góry graniczą z atmosferą, a od dołu ze zwierciadłem wód gruntowych, które stanowiło warstwę nieprzepuszczalną dla powietrza. Odcinek rur, przez który zasysane było powietrze gruntowe za każdym razem był umiejscowiony na głębokości 8+9 m, co oznacza, iż znajdował się on tuż nad zwierciadłem wód gruntowych. Takie ułożenie filtru jest najkorzystniejsze, gdyż bardzo często właśnie tam zalega największa ilość zanieczyszczeń, a zatem w tym miejscu powinien występować najintensywniejszy przepływ powietrza gruntowego. Zadana w symulacjach przepuszczalność ośrodka modelowego charakteryzowała glebę piaszczystą, a więc grunt o dobrych właściwościach filtracyjnych. Podciśnienie wewnątrz rur zostało założone na poziomie 0,9 atm.

Wyniki symulacji przedstawiono na rysunkach konturowych (rys. 5 i 6), które obrazują rozkład ciśnienia (A1–D1) oraz masowego natężenia przepływu (A2–D2) powietrza gruntowego w ośrodku na głębokości 6 m.

Z analizy rysunków wynika, że najintensywniejszy przepływ powietrza występuje w najbliższym otoczeniu rur ssących. Na obrzeżach ośrodków modelowych przepływ powietrza jest niewielki, a ciśnienie powietrza równe jest ciśnieniu atmosferycznemu. Im bliżej studni ssących tym występują większe gradienty ciśnienia, spowodowane ich bezpośrednim oddziaływaniem.

Izobary na rysunkach 5 i 6 obrazują strefę oddziaływania studni odsysających. Prędkość powietrza przepływającego przez ośrodek nie jest stała, lecz rośnie wraz ze zbliżaniem się do studni odsysającej. Spowodowane jest to tym, że wraz ze zmniejszaniem się odległości do studni maleje powierzchnia prostopadła do kierunku przepływu powietrza.



Rys. 5. Rozkłady ciśnień (A1+B1, atm) oraz rozkłady masowych natężeń przepływu (A2+B2, $\cdot 10^{-6}$ kg/m²s) dla układów A i B w ośrodku o przepuszczalności $k_{xy}=k_z=1 \cdot 10^{-11}$ m²

Rozkłady izobar w poszczególnych układach wskazują, iż podciśnienie w rurach równe 0,9 atm nie jest zbyt duże, co powoduje, że gradienty ciśnienia w promieniu oddziaływania rur ssących są niewielkie, a w związku z tym dość powolny jest również przepływ powietrza w tych strefach. Ilość powietrza dostająca się do ośrodka przez powierzchnię górną i ze strony ścian bocznych jest zbliżona dla wszystkich układów rur ssących.

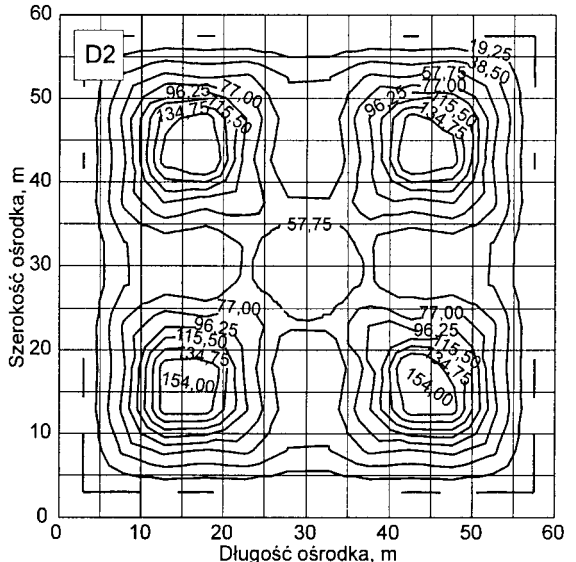
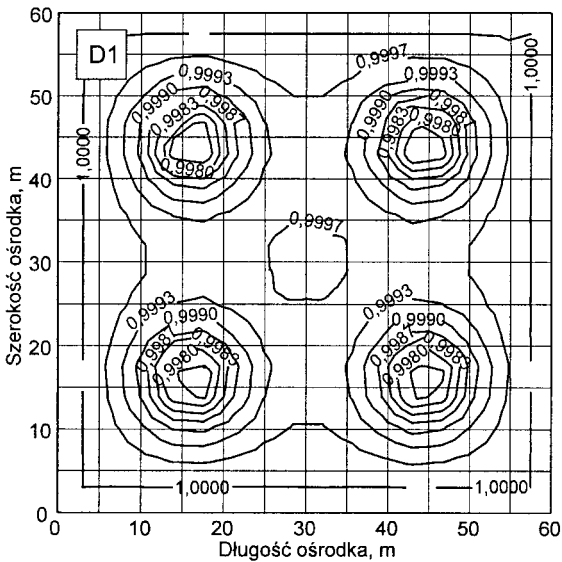
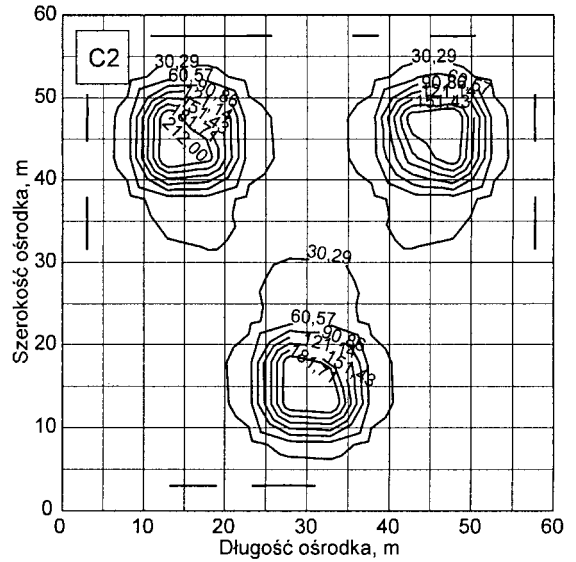
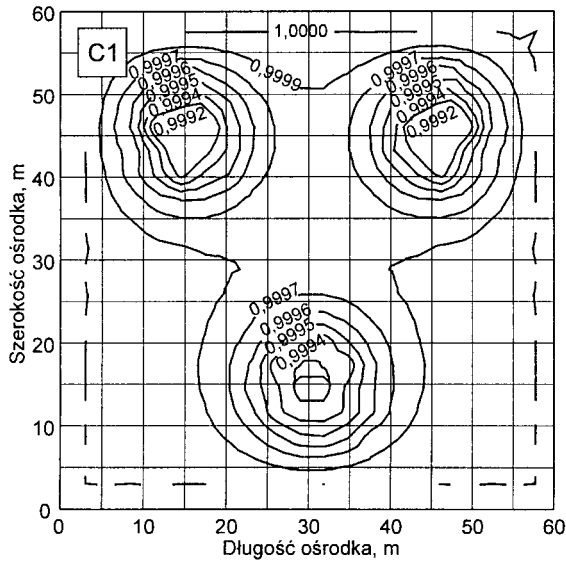
Taki rozdział ilości powietrza dopływającego do ośrodka od powierzchni górnej i bocznych jest także rezultatem sposobu umiejscowienia odcinka perforowanego rury. Im głębiej umiejscowiona jest ta część studni tym bardziej intensywny przepływ powietrza występuje w dolnej warstwie gruntu. Z kolei wydłużenie odcinka perforowanego pozwala uzyskać większe natężenia przepływu powietrza w ośrodku, lecz z drugiej strony sprawia, iż znaczna ilość powietrza dociera do gruntu z jego powierzchni, zmniejszając tym samym zasięg oddziaływania rur ssących.

Rozkłady ciśnień i natężeń przepływu powietrza gruntowego dla poszczególnych układów rur w ośrodku wskazują również, że bardzo istotnym parametrem jest sposób rozmieszczenia studni. W układach A, C i D z powodu zbyt dużego oddalenia od siebie rur wytwarza się pomiędzy nimi strefa o bardzo małym przepływie powietrza. Odległość pomiędzy rurami nie została więc dobrana optymalnie dla tego niewielkiego podciśnienia założonego w studniach, czego wyrazem jest izobara 0,9997 widoczna w centralnej części układu D. W układzie rzeczywistym prowadziłoby to do powstawania strefy martwego przepływu, a w konsekwencji do poważnych trudności w usuwaniu zalegających w tym miejscu zanieczy-

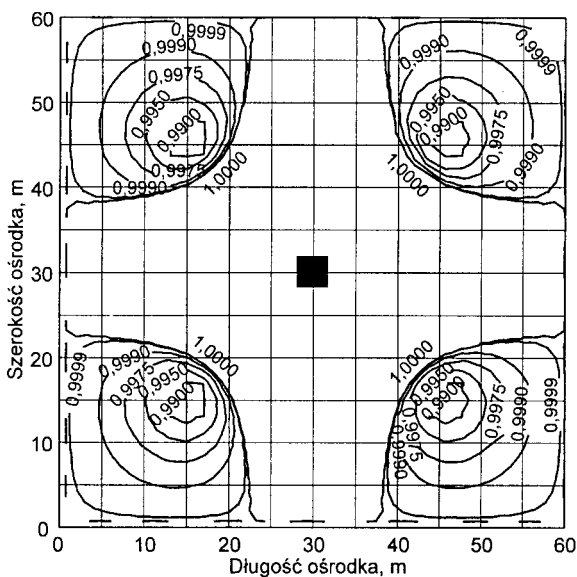
szczeń. Ten niekorzystny scenariusz można w prosty sposób wyeliminować poprzez umieszczenie w tym miejscu studni napowietrzającej złoża, co zostało przedstawione na rysunku 7.

W wypadku układu trzech rur ułożonych szeregowo (układ B) widoczne jest wzajemne oddziaływanie studni, na co wskazuje charakterystyczne ułożenie izobar i linii stałego natężenia przepływu powietrza w strefach pomiędzy rurami lewą i środkową oraz środkową i prawą (rys. 5 – B1 i B2). Uzyskane wartości całkowitego natężenia przepływu powietrza przez ośrodki wskazują, iż najbardziej intensywny przepływ powietrza w modelowej warstwie gruntu można uzyskać dla układu czterech rur ssących. Jednak należy pamiętać, że rozmieszczenie rur w układzie kwadratowym powoduje powstawanie w centralnej części ośrodka strefy o znikomym przepływie. Z tego względu, aby nie stosować dodatkowych rur napowietrzających, najlepszym rozwiązaniem wydaje się układ trzech rur ustawionych szeregowo i oddalonych od siebie o 17 m. Stosunkowo bliski kontakt pomiędzy wszystkimi rurami uniemożliwia powstanie stref o małym przepływie powietrza, a więc w rzeczywistości pozwoli na bardziej równomierne oczyszczanie warstwy gruntu.

Celem kolejnych symulacji było sprawdzenie, w jakim stopniu przepuszczalność gruntu wpływa na szybkość oraz natężenie przepływu powietrza gruntowego w badanej warstwie złoża. Symulacje przeprowadzone zostały dla wybranego układu czterech studni (układ D) odsysających w ośrodkach o zmniejszonej przepuszczalności i ośrodka anizotropowym. Uwzględnienie w obliczeniach gruntu o mniejszej przepuszczalności, przy zachowaniu pozostałych parametrów (liczba rur ssących w układzie, długość i głębokość perforacji



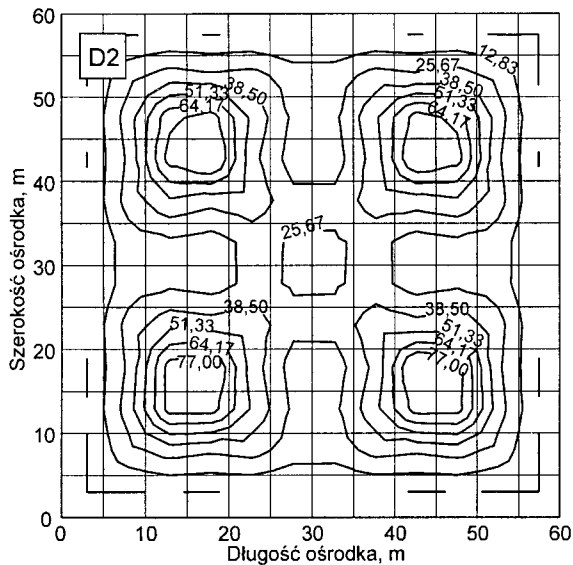
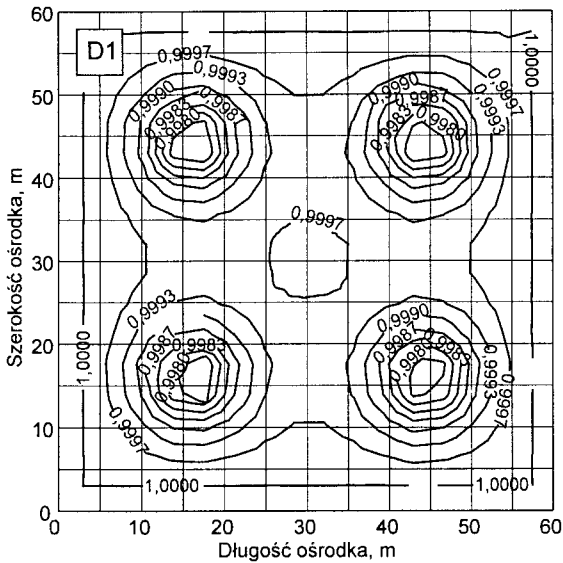
Rys. 6. Rozkłady ciśnień (C1+D1, atm) oraz rozkłady masowych natężeń przepływu (C2+D2, $\cdot 10^{-6}$ kg/m²s) dla układów C i D w ośrodku o przepuszczalności $k_{xy}=k_z=1 \cdot 10^{-11}$ m²



Rys. 7. Układ D z centralną studnią napowietrzającą (2 atm)

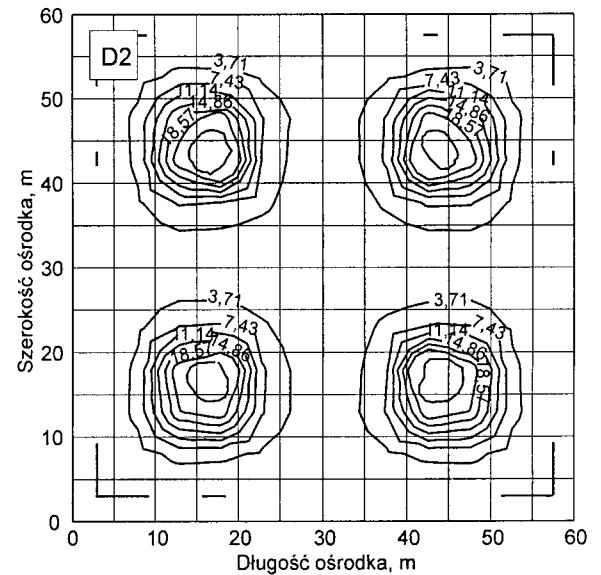
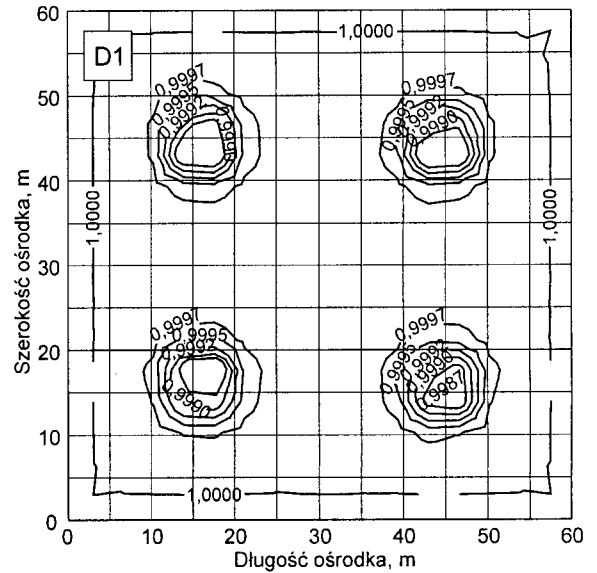
ur, podciśnienie) na takim samym poziomie jak w poprzednich symulacjach, spowodowało spadek natężenia przepływu powietrza przez ośrodek mniej więcej o jeden rząd. Kształty linii ukazujących rozkłady ciśnień i natężeń przepływu są takie same jak w wypadku symulacji w ośrodku o współczynnikach przepuszczalności $k_{xy}=k_z=1 \cdot 10^{-11}$ m². Z wykresów przedstawiających pola ciśnień wynika, iż zmniejszenie przepuszczalności gruntu, przy zachowaniu izotropowości ośrodka, nie powoduje zmiany rozkładu izobar powietrza gruntowego, lecz wyłącznie spadek szybkości jego przepływu. Wartości masowych natężeń przepływu dla ośrodka o 10-krotnie zmniejszonej przepuszczalności były około dwukrotnie mniejsze (rys.8).

W ośrodku anizotropowym, w którym współczynnik anizotropii wynosił $k_{xy}/k_z=1/5$, wystąpił znacznie większy spadek szybkości przepływu powietrza przez ośrodek. Porównując pola ciśnień i natężeń przepływu można zauważyć, że w ośrodkach anizotropowych następuje zupełnie inny rozkład tych wielkości. Ruch powietrza odbywa się głównie w kierunku, w którym właściwości filtracyjne gruntu są lepsze. Ilość powietrza dostającego się do ośrodka z atmosfery jest w tym



Rys. 8. Rozkład ciśnienia (D1) i masowych natężeń przepływu powietrza gruntowego (D2, $\cdot 10^{-6}$ kg/m²s) dla układu D w ośrodku o $k_{xy}=k_z=5 \cdot 10^{-12}$

wypadku bliska całkowitej ilości przepływającego przez niego powietrza. W takim wypadku występuje mniejszy promień oddziaływania rur ssących, a ponadto w ich najbliższym sąsiedztwie występują także bardzo małe gradienty ciśnienia. Dlatego przepływ powietrza odbywa się tylko w najbliższym sąsiedztwie rur ssących, co w układach rzeczywistych może uniemożliwić usunięcie zanieczyszczeń z obszarów bardziej oddalonych (rys.9).



Rys. 9. Rozkłady ciśnienia (D1) i masowych natężeń przepływu powietrza gruntowego (D2, $\cdot 10^{-6}$ kg/m²s) dla układu D w ośrodku anizotropowym

Anizotropia ośrodka powoduje, iż pojawia się w nim więcej stref, w których przepływ powietrza nie występuje lub jest znikomy. Zatem desorpcja zanieczyszczeń z gruntu byłaby w tym wypadku zdecydowanie mniej efektywna.

Wyniki wszystkich prezentowanych symulacji, informujące o całkowitej ilości powietrza, która przepływa przez ośrodek w jednostce czasu, zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Zestawienie wyników symulacji

| Układ rur | k_{xy} m ² | k_z m ² | Sumaryczne natężenie przepływu powietrza przez ośrodek m ³ /s | Ilość powietrza przechodząca przez górną powierzchnię obszaru % | Ilość powietrza przechodząca przez ściany boczne obszaru % |
|-----------|----------------------------|-------------------------|---|--|---|
| A | $1 \cdot 10^{-11}$ | $1 \cdot 10^{-11}$ | $1,570 \cdot 10^{-2}$ | 71,18 | 28,82 |
| B | $1 \cdot 10^{-11}$ | $1 \cdot 10^{-11}$ | $2,353 \cdot 10^{-2}$ | 77,50 | 22,50 |
| C | $1 \cdot 10^{-11}$ | $1 \cdot 10^{-11}$ | $1,157 \cdot 10^{-2}$ | 71,79 | 28,21 |
| D | $1 \cdot 10^{-11}$ | $1 \cdot 10^{-11}$ | $3,144 \cdot 10^{-2}$ | 72,51 | 27,49 |
| D | $5 \cdot 10^{-12}$ | $5 \cdot 10^{-12}$ | $1,572 \cdot 10^{-2}$ | 72,51 | 27,49 |
| D | $1 \cdot 10^{-12}$ | $1 \cdot 10^{-12}$ | $3,852 \cdot 10^{-2}$ | 96,69 | 33,10 |

Podsumowanie

Komputerowe modelowanie przepływu powietrza w gruncie może być bardzo przydatne na etapie projektowania układów do desorpcji próżniowej zanieczyszczeń z gruntu. Przeprowadzenie symulacji przepływu powietrza w gruncie o zadanych właściwościach hydrogeologicznych umożliwia wybranie optymalnego układu geometrycznego rur ssących, bez konieczności przeprowadzenia żmudnych badań eksperymentalnych. Wyniki symulacji przeprowadzonych w ośrodkach o niskiej przepuszczalności wykazały, że mogą pojawiać się istotne problemy związane z zaprojektowaniem wydajnego układu do desorpcji próżniowej zanieczyszczeń. Zmniejszenie przepuszczalności gruntu o rząd wartości wymaga wprowadzenia zmian podstawowych parametrów charakteryzujących pracę instalacji do desorpcji próżniowej, aby wydajność procesu odnowy gruntu była zadowalająca. Różnego podejścia wymagają także grunty o właściwościach izotropowych i anizotropowych, gdyż charakteryzują się one innym sposobem rozkładu gradientów ciśnienia powietrza gruntowego, co powoduje zmienne kierunki przepływu powietrza.

LITERATURA

1. J. S. CHO, D. C. DIGULIO: The simulation of air flow in soil vacuum extraction system by 3D ground water flow model. Conference of Hazardous Waste Research Proceedings, Kansas State University, Manhattan 1990, pp. 621–635.
2. D. WILSON: Modelling of In-Situ Techniques for Treatment of Contaminated Soils. Technomic Publishing Company, 1995.
3. G. FURDYN, Z. KAWALA: Odnowa zanieczyszczonych gruntów metodami *in-situ*. Ochrona Środowiska, 1996, nr 2(61), ss. 27–34.
4. Z. KAWALA, T. ATAMAŃCZUK: Zastosowanie prądów wysokiej częstotliwości i mikrofal do oczyszczania gruntów z substancji ropopochodnych. Ochrona Środowiska, 1998, nr 1(68), ss. 43–47.
5. D. L. JORDAN, J. W. MERCER, R. M. COHEN: Review of mathematical modeling for evaluating soil vapor extraction system. Raport EPA/540/R-95/513, Ohio 1995.
6. W. P. BEAHR, M. F. HULT: Evaluation of unsaturated zone air permeability through pneumatic tests. Water Res., 1991, Vol. 27, pp. 2605–2617.
7. G. FURDYN, Z. KAWALA: Symulacja przepływu powietrza w gruncie podczas oczyszczania skażonego terenu. Mat. konf. „Współczesne problemy hydrologii”, Kiekrz 1997, ss. 283–286.
8. M. SEPEHR, Z. A. SAMANI: In situ soil remediation using vapor extraction wells, development and testing of a three-dimensional finite-difference model. Ground Water, 1993, Vol. 31, pp. 425–436.
9. P. C. JOHNSON, M. W. KEMBLOWSKI: Quantitative analysis for the cleanup of hydrocarbon-contaminated soils by in-situ soil venting. Ground Water, 1990, Vol. 28(3), pp. 413–429.
10. S. CHAO, R. W. FALTA, I. JAVANDEL: Analytical solution for steady state gas flow to a soil vapor extraction well. Water Res., 1992, Vol. 28, pp. 1105–1120.
11. J. S. CHO: A three-dimensional air flow model for soil venting: superposition of analytical functions. Journal Hazard. Mat., 1993, Vol. 35, pp. 31–51.
12. C. J. JOSS, A. L. BEAHR: Documentation of AIR3D, an adaptation of the ground-water flow code modflow to simulate three-dimensional air flow in unsaturated zone. U.S. Geological Survey Open-File Report 94-533, West Trenton 1995.

Computer Simulation of Pressure Distributions and Air Flow Rates in the Process of Soil Vapor Extraction

Soil and groundwater contamination by petroleum hydrocarbons and organic solvents has become a worldwide problem, which primarily faces high-technology countries. Soil vapor extraction (SVE) of volatile and some semivolatile compounds is rapidly being recognized as a technically and economically sound alternative to the available methods of cleaning chemically polluted soils. SVE entails the induction of an advective air phase through the contaminated vadose zone of the soil. In the unsaturated zone, the air flow can be established with combinations of withdrawal (extraction) and injection (if required) wells. Air laden with the contaminant vapors moves along the induced flow paths toward the withdrawing system, where it is subject to after-treatment. If the process is carried out for a sufficiently long time, it will be possible to remove all of the contaminants from the soil. The use of the SVE method provides continuous air flow through the vadose zone, which is a requisite

for an efficient cleaning operation. A reliable assessment of the pressure distributions in the vicinity of the extraction wells, and a thorough analysis of the air flow conditions are of great importance to the design of an optimal SVE system, as well as to the determination of the major operating parameters. The present paper describes a three dimensional mathematical model which predicts the steady-state air flow through the unsaturated zone of the soil. The paper also includes the results of a computer simulation of air flow in soils, using the AIR3D software developed by Joss and Baehr. With this software it was possible to examine how the properties of the soil (porosity, permeability and anisotropy) and the operating parameters of the SVE system (number and arrangement of the wells, depth and length of the filters, vacuum head in the wells) affect the pressure distribution, the mass and volumetric air flow rate, as well as the components of the air velocity vector in the soil.