

## **ZAŁOŻENIA METODYCZNE W ZAKRESIE MODELOWANIA MIGRACJI RADIONUKLIDÓW W ŚRODOWISKU GEOLOGICZNYM W SĄSIEDZTWIE SKŁADOWISK NISKO- I ŚREDNIOAKTYWNYCH ODPADÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH**

### **STRESZCZENIE**

Modelowanie migracji radionuklidów w środowisku geologicznym w sąsiedztwie powierzchniowych składowisk promieniotwórczych odpadów nisko- i średnioaktywnych jest jednym z istotniejszych elementów wpływającym na ocenę długotrwałego bezpieczeństwa tych składowisk. Poza opisem zagadnień związanych z numerycznym modelowaniem migracji radionuklidów w środowisku geologicznym artykuł przedstawia również w skrócie metodykę oceny bezpieczeństwa polegającą na: określeniu scenariuszy uwalniania radionuklidów do środowiska, sformułowaniu modeli koncepcyjnych migracji radionuklidów w środowisku geologicznym, stworzeniu modelu geologicznego i hydrogeologicznego oraz implementacji tych modeli do obliczeń numerycznych i oceny narażenia człowieka na promieniowanie.

### **SŁOWA KLUCZOWE**

Migracja radionuklidów, model hydrogeologiczny, modelowanie koncepcyjne, modelowanie numeryczne

\* \* \*

Modelowanie migracji radionuklidów w środowisku geologicznym ma na celu określenie kierunków migracji, całkowitej aktywności kluczowych radionuklidów uwolnionych do środowiska oraz określenie potencjalnego narażenia człowieka na promieniowanie. Modelowanie jest jednym z podstawowych narzędzi stosowanych w opracowywaniu długoterminowych ocen bezpieczeństwa przypowierzchniowego składowiska promieniotwórczych odpadów nisko- i średnioaktywnych. Opracowanie oceny bezpieczeństwa takich składowisk wymagają (IAEA 2004a):

1. Określenia zakresu oceny bezpieczeństwa.
2. Charakterystyki systemu składowania.
3. Opracowania scenariuszy uwalniania radionuklidów.

4. Sformułowania i implementacji poszczególnych modeli.
5. Analizy rezultatów wynikających z przeprowadzonych modelowań.

## ZAKRES OCENY BEZPIECZEŃSTWA

Zakres oceny bezpieczeństwa określa jej cel oraz formę oczekiwanych wyników. Zazwyczaj podstawowym celem oceny bezpieczeństwa jest przedstawienie możliwości osiągnięcia akceptowalnego poziomu ochrony zdrowia ludzkiego i ochrony środowiska w fazie eksploatacyjnej i poeksploatacyjnej składowiska odpadów promieniotwórczych. Drugorzędne cele takiej oceny są zazwyczaj związane z rozpatrzeniem wstępnych koncepcji składowania oraz uzyskaniem licencji na składowanie odpadów promieniotwórczych.

Ocena bezpieczeństwa jest opracowywana w odniesieniu do odpowiednich regulacji dotyczących ochrony radiologicznej wynikających z krajowych i międzynarodowych aktów prawnych. Wymaga ona również założeń dotyczących ram czasowych uwzględniających okres działania składowiska, trwania kontroli instytucjonalnej, degradacji barier inżynierskich, a także czas połowicznego rozpadu odpowiednich izotopów zawartych w odpadach oraz szybkości zmian antropogenicznych i naturalnych środowiska.

## CHARAKTERYSTYKA SYSTEMU SKŁADOWANIA

Przeprowadzenie modelowania mającego na celu określenie potencjalnego skażenia środowiska geologicznego wymaga zebrania danych lub przyjęcia założeń dotyczących wszystkich trzech podstawowych elementów systemu składowania tzn.: składowiska, budowy geologicznej w otoczeniu składowiska i biosfery.

W przypadku składowiska najistotniejsze z punktu widzenia migracji radionuklidów jest zidentyfikowanie: obszaru składowania, budowy składowiska, rodzaju składowanych odpadów i ich rozmieszczenia oraz zastosowanych pojemników oraz barier inżynierskich. Informacje te pozwalają na określenie trwałości pojemników i zastosowanych barier inżynierskich, na określenie tempa i rodzaju uwalnianych się ze składowiska poszczególnych radionuklidów oraz na wyłonienie krytycznych radionuklidów uwalnianych ze składowiska przyjmowanych do dalszego modelowania.

Opis geosfery zazwyczaj obejmuje charakterystykę geologiczną i hydrogeologiczną obszaru wokół składowiska pozwalającą na określenie modelu geosfery wykorzystywanego w modelowaniu migracji radionuklidów. Charakterystyka biosfery pozwala natomiast na określenie głównych dróg transportu ewentualnego skażenia i poziomu narażenia człowieka na promieniowanie.

## SCENARIUSZE OCENY BEZPIECZEŃSTWA

Opracowanie scenariuszy uwalniania radionuklidów ich migracji oraz narażenia na skażenie promieniotwórcze jest obecnie powszechną praktyką w ocenie bezpieczeństwa składowisk. Mają one na celu identyfikację wszelkich wątpliwości w przyszłej ewolucji systemu składowania. Scenariusze są ważnym elementem oceny bezpieczeństwa, ponieważ:

- określają kontekst, w którym dokonywana jest ocena,
- są pomocne w opracowaniu modeli i zbieraniu odpowiednich danych,
- stanowią ważny obszar komunikacji pomiędzy operatorem składowiska, jednostkami nadzoru oraz pozostałymi interesariuszami,
- są bardzo ważnym aspektem budowania zaufania dla oceny bezpieczeństwa po zamknięciu składowiska odpadów promieniotwórczych.

Modelowanie migracji radionuklidów w środowisku geologicznym przeprowadzane jest zwykle według dwóch podstawowych scenariuszy uwalniania radionuklidów do geosfery:

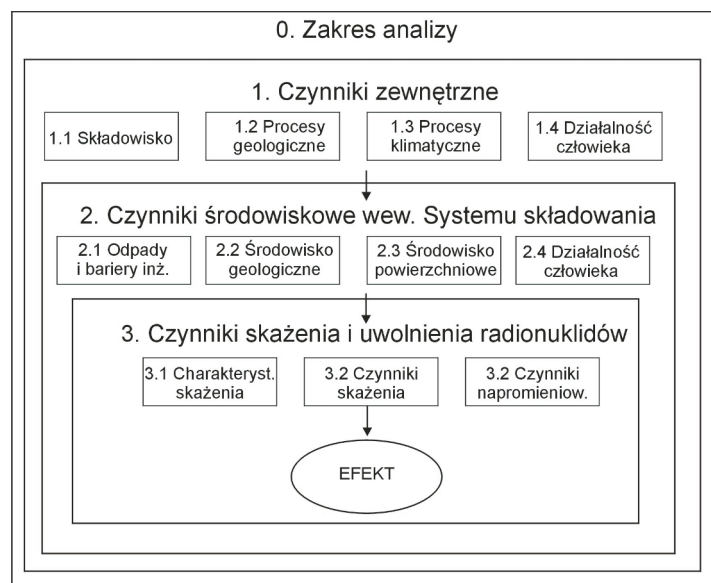
1. Scenariusza projektowego zakładającego migrację radionuklidów uwolnionych wskutek powolnego ługowania materiałów wiążących i powolną degradację barier inżynierskich.

2. Scenariusza awarii projektowej zakładającej wartości uwolnienia radionuklidów wielokrotnie większe niż w poprzednim przypadku zarówno w trakcie pracy składowiska, w chwili jego zamknięcia składowiska, w okresie ochrony instytucjonalnej oraz po zakończeniu okresu monitoringu, tj. po 300 latach od zamknięcia składowiska.

Opracowanie takich scenariuszy można przeprowadzić na podstawie różnych metodologii. Najpowszechniej stosuje się obecnie metodologię ISAM (Improvement of Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities) opracowaną przez ekspertów Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (IAEA 2004a, IAEA 2004b). Zakłada ona opracowanie scenariuszy na podstawie wyróżniających się cech składowiska i środowiska (*Features*), jakościowych i ilościowych zmian zachodzących w określonym czasie i przestrzeni (*Events*) i zjawisk wynikających ze stopniowych zmian prowadzących do konkretnego rezultatu (*Process*).

Lista cech, zjawisk i procesów (FEP) została stworzona według schematu klasyfikacyjnego przedstawionego na rysunku 1 dzielącego zagadnienia związane ze składowiskiem odpadów promieniotwórczych na poszczególne warstwy i kategorie.

Wspólną cechą wielu metodologii przygotowania scenariuszy jest opracowanie listy FEP, które mogą bezpośrednio lub pośrednio wpływać na system składowania odpadów promieniotwórczych. Aktualna, kompleksowa wersja listy FEPS IAEA zmodyfikowana do potrzeb przypowierzchniowych składowisk nisko- i średnioaktywnych odpadów promieniotwórczych opracowana została na podstawie wcześniejszej listy proponowanej przez Agencję Energii Jądrowej (NEA OECD 2001).



Rys. 1. Schemat klasyfikacyjny stosowany do tworzenia listy FEP w metodologii ISAM (IAEA 2004a)

Fig. 1. The classification scheme used to develop the ISAM FEPs list

## SFORMUŁOWANIE I IMPLEMENTACJA MODELI

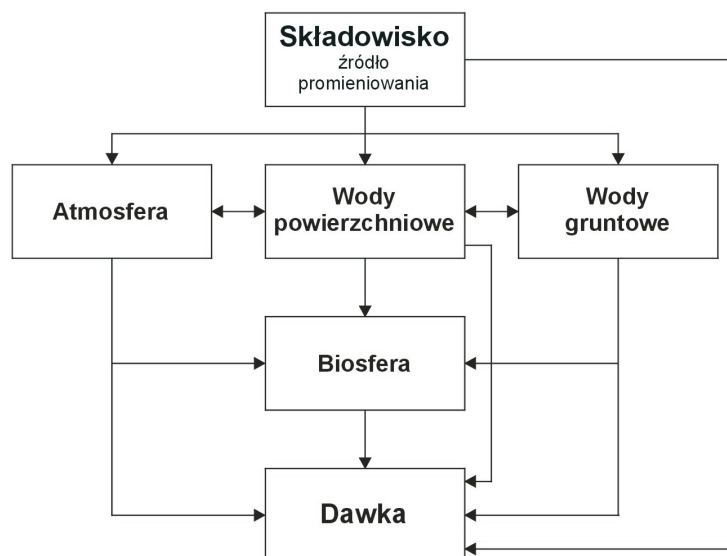
Opracowanie modeli koncepcyjnych jest kolejną fazą procesu oceny bezpieczeństwa, w którym stosuje wiele hipotetycznych scenariuszy, aby ocenić bezpieczeństwo systemu składowania odpadów promieniotwórczych w zależności od zamierzonych celów (np. ocena dawki promieniowania w sąsiedztwie składowiska, na jaką narażony będzie człowiek).

Modele koncepcyjne opisują cechy, zjawiska i procesy występujące w przyjętych scenariuszach, tzn.:

- uwalnianie radionuklidów ze składowiska do środowiska (pośrednio przez geosferę np. w przypadku powolnego ługowania radionuklidów z odpadów promieniotwórczych lub w sposób bezpośredni do biosfery np. przez bezpośrednią ingerencję człowieka),
- transport radionuklidów w geosferze i biosferze,
- identyfikację dróg narażenia na skażenie.

Przykładowy ogólny model koncepcyjny w przypadku zastosowania scenariusza projektowego dotyczącego uwalniania i transportu radionuklidów jak również narażenia na promieniowanie jonizujące przedstawia rysunek 2.

Analiza ilościowa konsekwencji wynikających z opracowanych scenariuszy jest prowadzona za pomocą modeli numerycznych opisujących procesy przedstawione w modelach koncepcyjnych. Modele koncepcyjne mogą być zdefiniowane jako zestaw założeń sto-



Rys. 2. Ogólny model koncepcyjny uwalniania i migracji radionuklidów oraz narażenia na promieniowanie jonizujące

Fig. 2. General conceptual model of radionuclide release, migration and exposure

sowanych do opisywanego systemu. Założenia te dotyczą geometrii systemu warunków brzegowych i początkowych (ustalenia tzw. tła), natury procesów fizycznych i chemicznych oraz czasu.

Opracowanie modeli koncepcyjnych dla uprzednio ustalonych scenariuszy wymaga szczegółowego określenia:

- źródła skażenia,
- mechanizmów uwalniania skażenia,
- środowiska migracji radionuklidów,
- mechanizmów transportu,
- źródła narażenia na promieniowanie,
- mechanizmów prowadzących do narażenia napromieniowania.

Po określeniu i uzasadnieniu scenariuszy uwalniania radionuklidów opracowywane są modele koncepcyjne mechanizmów odpowiedzialnych za migrację oraz modele struktur w obrębie składowiska.

Początkowo jedną z powszechnie stosowanych metod do opracowania modeli koncepcyjnych w ocenach bezpieczeństwa przypowierzchniowych składowisk LILW jest metoda SACO (Safety Assessment Comparison) opierająca się na ciągłym rozwijaniu podstawowego modelu w zależności od posiadanych informacji opracowanego na podstawie istniejących danych dotyczących źródła skażenia, mechanizmów uwalniania radionuklidów, mediów transportujących radionuklidy, mechanizmów transportu, źródeł narażenia na skażenie oraz mechanizmy narażenia (Little R.H. et al. 1996). Pierwszym krokiem jest identy-

fikacja uwalniania radionuklidów oraz ich transportu, a także sposobu narażenia na skażenie poprzez identyfikację FEP związanych z każdym scenariuszem. Następnie identyfikowane są ich mechanizmy. W przypadku standardowego scenariusza wiążącego się z powolnym ługowaniem radionuklidów ze składowanych odpadów rozważane są następujące media transportu mechanizmy i sposoby narażenia na promieniowanie jonizujące przedstawione w tabeli 1.

*Tabela 1*

*Ośrodki i mechanizmy transportu oraz sposoby narażenia na promieniowanie jonizujące rozważane w scenariuszach uwalniania i migracji radionuklidów pochodzących z odpadów promieniotwórczych*

*Table 1*

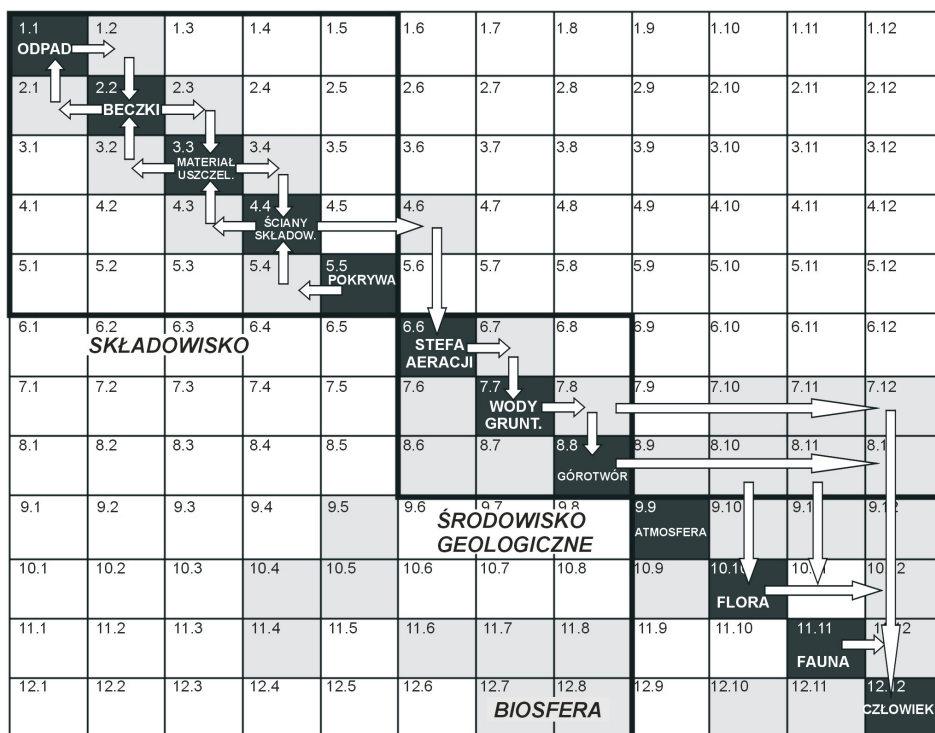
*Medium and mechanisms of release, transport and exposure considered in scenarios of radionuclide migration release from radioactive waste*

Mechanizm uwalniania skażenia	Ośrodki transportu	Mechanizmy transportu skażenia	Mechanizmy narażenia człowieka na promieniowanie
Ługowanie	<ul style="list-style-type: none"> <li>– odpady</li> <li>– środowisko geologiczne</li> <li>– wody gruntowe</li> <li>– gleby</li> <li>– uprawy</li> <li>– zwierzęta</li> <li>– atmosfera</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– adwekcja</li> <li>– dyspersja</li> <li>– adsorpcja</li> <li>– pobór wody do nawadniania i wody pitnej</li> <li>– wchłanianie przez korzenie</li> <li>– spożycie skażonej wody i roślin przez zwierzęta</li> <li>– ługowanie</li> <li>– erozja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– spożycie wody, produktów roślinnych i zwierzęcych</li> <li>– wdychanie skażonego powietrza</li> <li>– zewnętrzne napromieniowanie (gleba)</li> </ul>

Alternatywnym sposobem opracowania modeli koncepcyjnych jest metoda konstrukcji macierzy interakcji. Metoda polega na graficznym opracowaniu tablicy ujmującej wszystkie zidentyfikowane komponenty danego systemu składowania odpadów promieniotwórczych. Są one umieszczone na tzw. głównej przekątnej tablicy. Interakcje pomiędzy tymi komponentami są reprezentowane poprzez mechanizmy i procesy przedstawione w komórkach umieszczonych poza główną przekątną macierzy.

Konstrukcja modeli koncepcyjnych tą metodą polega na identyfikacji interakcji pomiędzy głównymi komponentami systemu składowania oraz procesami i ich mechanizmami, wyznaczając tzw. ścieżki interakcyjne obrazujące możliwe hipotetyczne scenariusze uwalniania i migracji radionuklidów. Przykładową macierz interakcji stosowaną do opracowania modeli koncepcyjnych uwalniania radionuklidów ze składowiska przypowierzchniowego i ich migracji przedstawia rysunek 3.

Interakcje zobrazowane strzałkami pomiędzy poszczególnymi komponentami systemu składowania ułożonymi na głównej przekątnej związane w tym przypadku są z następującymi procesami transportu oraz narażenia na promieniowanie jonizujące:



Rys. 3. Przykładowa macierz interakcji wykorzystywana do konstrukcji modeli koncepcyjnych w przypadku przypowierzchniowego składowiska odpadów promieniotwórczych

Fig. 3. Example interaction matrix used to develop conceptual models for near surface radioactive waste repository

- w obrębie składowiska – 1.2, 2.1, 2.3, 3.2, 3.4, 4.3, 4.6, 5.4 – przepływ wody (adwekcja i dyfuzja) związany z infiltracją i przesączaniem,
- w obrębie środowiska geologicznego 6.7, 7.8 – transport skażenia (adwekcja, dyfuzja, sorpcja),
- w obrębie biosfery: 7.12 pobór wody ze studni, 8.12 spożycie wody, 10.12, 11.12 spożycie upraw i produktów hodowlanych.

W przypadku modelowania migracji radionuklidów w środowisku geologicznym modele koncepcyjne obejmują zarówno model budowy geologicznej, model hydrogeologiczny środowiska oraz model geochemiczny.

## MODEL GEOLOGICZNY I HYDROGEOLOGICZNY

Zasadniczo stworzenie modelu hydrogeologicznego będącego odzwierciedleniem struktury i procesów w systemie wodonośnym wymaga m. in. określenia (IAEA 2001, Dąbrowski i in. 2003):

- budowy geologicznej badanego ośrodka determinującej występowanie wód:
  - rozprzestrzenienie utworów wodonośnych,
  - charakterystyka litologiczna i skład mineralny poszczególnych warstw,
  - miąższość warstw wodonośnych i warstw izolujących,
  - charakter porowatości i dróg krążenia;
- parametrów hydrogeologicznych skał wodonośnych i izolujących:
  - współczynnik filtracji,
  - porowatość efektywna;
- parametrów wód podziemnych:
  - spadek hydrauliczny w polu filtracji,
  - stany zwierciadła wód podziemnych,
  - położenie zwierciadła wód powierzchniowych związanych z wodami podziemnymi;
- warunków zasilania, przepływu i drenażu:
  - ukształtowanie powierzchni (rzeźba terenu),
  - wartość filtracji opadowej oraz jej rozkład,
  - kontakty i przepływy wód pomiędzy warstwami wodonośnymi,
  - identyfikacja stref drenażu i zasilania naturalnych cieków i zbiorników wodnych;
- czynników antropogenicznych kształtowania przepływów i zasilania wód podziemnych:
  - ujęcia wody i inne system drenażu,
  - sztuczne zbiorniki wodne, kanały i budowle piętrzące;

Do stworzenia modelu hydrogeologicznego wykorzystuje się dane źródłowe w postaci:

- danych punktowych: profile wierceń, wyniki pompowań, wyniki badań filtracji, wynik analiz fizykochemicznych, pomiary głębokości zwierciadła,
- dane o charakterze liniowym: wyniki badań geofizycznych, przekroje geologiczne, przekroje hydrogeologiczne,
- dane obszarowe: mapy geologiczne, hydrogeologiczne, sozologiczne, hydrograficzne i inne archiwalne dokumentacyjne materiały.

Model geochemiczny obejmujący identyfikację podstawowych parametrów takich jak: skład chemiczny roztworów, pH, potencjału redoks Eh, siłę jonową, pojemność buforową, możliwość powstawania związków kompleksowych powinien z kolei pozwolić na określenie wartości rozpuszczalności, współczynników sorpcji i dyfuzji, jak również szybkości korozji zakładając ewolucję środowiska i zmianę parametrów geochemicznych w czasie (Russell 2005).

## **MODEL NUMERYCZNY**

Opracowanie modeli numerycznych ma za zadanie przedstawienie w sposób ilościowy procesów i zjawisk przedstawionych w modelach koncepcyjnych.

Modelowanie procesu rozprzestrzeniania radionuklidów w otoczeniu składowiska odpadów promieniotwórczych wymaga uwzględnienia budowy geologicznej i warunków hydro-



geologicznych w celu ustalenia przeważających mechanizmów transportu i określeniu odpowiednich parametrów charakteryzujących dany mechanizm.

Podstawowe dane do opracowania modeli matematycznych migracji radionuklidów w geosferze dotyczą wielkości infiltracji, precypitacji, ewaporacji, parametrów hydraulicznych (nasylenie, przewodność hydrauliczna) oraz współczynników dyspersji dla poszczególnych radionuklidów.

Rozprzestrzenianie radionuklidów w ośrodkach porowatych, gdzie lokalizowana jest większość przypowierzchniowych składowisk odpadów promieniotwórczych zachodzi wraz z naturalnym kierunkiem i intensywnością rozplywu wód gruntowych. Proces propagacji skażenia można opisać z wystarczającą dokładnością za pomocą równania różniczkowego Darcy'ego.

Dla anizotropowych ośrodków niejednorodnych równanie to przyjmuje postać:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( A_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( A_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + Q = C \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

gdzie:

- $H(x,y,z,t)$  – wysokość położenia zwierciadła wody,
- $A_x, A_y, A_z$  – funkcje określające zdolność przemieszczania się wody przez obszar wzdłuż kierunków  $x, y, z$ ,
- $Q(x,y,z,t)$  – funkcja zasilania ze źródeł zewnętrznych,
- $C$  – funkcja zasobów wewnętrznych obszaru.

W przypadku migracji radionuklidów w obrębie strefy aeracji konieczna jest znajomość relacji dotyczących retencji wilgoci w tej strefie w celu określenia współczynnika filtracji. Jednym z najpopularniejszych rozwiązań w tym zakresie jest zastosowanie empirycznego wzoru van Genuchtena określającego względny współczynnik filtracji w zależności od wilgotności gleby i odpowiadającego stosunkowi współczynnika filtracji w strefie aeracji do współczynnika filtracji w warunkach pełnego nasycenia (Mallants i in. 2011).

Zazwyczaj ze względu na możliwą skomplikowaną budowę hydrogeologiczną i rozkład warunków brzegowych rozwiązanie wspomnianych równań możliwe jest tylko przy wykorzystaniu metod numerycznych.

Do symulacji migracji radionuklidów w obrębie geosfery zostało opracowanych wiele programów komputerowych zarówno ogólnodostępnych, jak i komercyjnych.

Różnią się one zastosowaną metodą symulacyjną, możliwością modelowania w określonych ośrodkach skalnych (porowate i spękane), zastosowanym rodzajem solvera czy ilością transportowanych faz. Najczęściej stosowane programy na tym etapie modelowania i ich charakterystykę przedstawia tabela 2.

Jednym z ogólnodostępnych symulatorów numerycznych pozwalających opracować model numeryczny strefy składowiska, przy uwzględnieniu rzeczywistej budowy geologicznej i warunków brzegowych, jest symulator TOUGH2. Oprogramowanie to zostało

Tabela 2

Wybrane programy komputerowe stosowane w symulacji procesów migracji radionuklidów w środowisku geologicznym

Table 2

Example computer software used in simulation of radionuclides migration in geosphere

Nazwa programu	Metoda symulacyjna	Model przepływu wód	Ilość faz	Solver transportu
DRAF	różnic skończonych	nasycony, nienasycony	1	+
FEMWATER	elementów skończonych	nasycony, nienasycony	1	zewnątrzny (FEMWASTE)
HYDRUS	elementów skończonych	nasycony, nienasycony	2	+
MELODIE	elementów i objętości skończonych	nasycony, nienasycony	2	+
MODFLOW	różnic skończonych	nasycony, nienasycony	1	zewnątrzny (MODPATH, MT 3D)
PORFLO	różnic skończonych	nasycony, nienasycony	1	+
TOUGH2	różnic skończonych	nasycony, nienasycony w porowatym i spękanym medium	2	+
VAM2D	elementów skończonych	nasycony, nienasycony	1	+

opracowane początkowo do opisu nieustalonego procesu migracji wód podziemnych i skojarzonego z nim procesu migracji radionuklidów w środowisku geologicznym (Oldenburg, Pruess 1996). Symulator wykorzystuje całkową metodę różnic skończonych w przestrzeni trójwymiarowej, uwzględniając anizotropię przepuszczalności hydraulicznej w modelowanej przestrzeni.

Do modelowania migracji radionuklidów wykorzystywany jest moduł EOS7R (Equation of State) uwzględniający przemiany promieniotwórcze pierwszego rzędu poprzez dodanie dwóch elementów masowych w postaci radionuklidów ( $Rn_1$ ,  $Rn_2$ ) symbolizujących izotop wyjściowy i produkt jego rozpadu.

Rozpad promieniotwórczy jest opisany równaniem:

$$\frac{dM^*}{dt} = -\lambda_{\kappa} M^{\kappa} \quad (2)$$

gdzie:

- $M^{\kappa}$  – masa radionuklidów ( $\kappa = Rn_1, Rn_2$ ) w jednostce objętości,
- $\lambda_{\kappa}$  – stała rozpadu wynikająca z czasu połowicznego rozpadu poszczególnych radionuklidów.

Symulator TOUGH2 uwzględnia adsorpcję radionuklidów modelowaną liniowo jako proces odwracalny, obliczając masę radionuklidów  $\kappa$  w poszczególnych elementach modelu jako:

$$M^{\kappa} = \phi \sum_{\beta} S_{\beta} \rho_{\beta} X_{\beta}^{\kappa} + (1-\phi) \rho_{R} \rho_{aq} X_{aq}^{\kappa} K_d \quad (3)$$

gdzie:

- $\phi$  – porowatość,
- $\beta$  – faza (gaz, ciecz),
- $S_{\beta}$  – stopień nasycenia fazą  $\beta$ ,
- $\rho_{\beta}$  – gęstość fazy  $\beta$ ,
- $X_{\beta}^{\kappa}$  – ułamek wagowy komponentu  $\kappa$ ,
- $K_d$  – współczynnik podziału radionuklidów.

W przypadku programu TOUGH2 w 2008 roku został opracowany zaawansowany model migracji radionuklidów w strefie aeracji na podstawie empirycznych wzorów van Genuchtena (Finsterle i in. 2008).

Poza symulatorem TOUGH2 istnieje szereg programów wykorzystujących własne solvery transportu takie jak MEODIE – autorski program opracowany przez francuski Instytut Ochrony Radiologicznej i Bezpieczeństwa Jądrowego (IRSN), czy pakiet programów HYDRUS (1D; 2D/3D) opracowanych w wyniku współpracy zespołów naukowych z Belgii, USA, Czech i Izraela (Šimůnek et al. 2008). Szerokim zastosowaniem cieszy się również w ocenie migracji skażeń w środowisku program MODFLOW opracowany w latach osiemdziesiątych przez USGS (Służba Geologiczna USA). Oprogramowanie to jest na bieżąco rozwijane, a ostatnia wersja darmowego kodu źródłowego MODFLOW-2005 została udostępniona w 2013 r.

Modelowanie numeryczne procesu migracji radionuklidów w środowisku geologicznym powinno być wykonane w kilku krokach, przy różnym poziomie szczegółowości. Pierwszy etap powinien pozwolić na określenie przybliżonego modelu regionalnego, wykraczającego znacząco poza strefę samego składowiska. W strefie modelu regionalnego należy uszczegółowić strefę samego składowiska odpadów, gdzie zależnie od: zmienności geometrii rozkładu utworów geologicznych, jakości i rozdzielczości danych oraz panujących warunków brzegowych, należy określić rozdzielczość siatki modelu numerycznego.

Dla przyjętych parametrów i scenariuszy uwalniania radionuklidów do otoczenia, wykorzystując metody numeryczne, należy określić wstępny zasięg oddziaływania składowiska. Jeżeli zasięg prognozowany oddziaływania składowiska nie wykroczy poza obszar objęty modelem uszczegółowionym, to wynik modelowania można będzie uznać za zadawalający. Jeżeli zasięg oddziaływania składowiska, dla przyjętych scenariuszy uwalniania radionuklidów, przekroczy zasięg modelu uszczegółowionego, to konieczne będzie powiększenie obszaru uszczegółowionego.

Na etapie modelowania wymagane jest również określenie przestrzennego rozkładu stałych opisujących warunki geologiczne i hydrogeologiczne w obszarze objętym modelowaniem. Zazwyczaj proces ten polega na określeniu przestrzennego rozkładu wybranych komponentów przestrzeni (najczęściej są to określone struktury geologiczne lub materiały cechujące się podobnymi własnościami fizycznymi).

Podstawowe parametry przypisywane poszczególnym węzłom siatki obliczeniowej to porowatość efektywna, gęstość oraz przepuszczalność hydrauliczna.

## CEL ANALIZ

Podstawowym celem prowadzonych symulacji migracji radionuklidów w środowisku geologicznym w rejonie przypowierzchniowych składowisk promieniotwórczych odpadów nisko- i średnioaktywnych jest ustalenie kierunków i intensywności przepływu wód złożonych i rozkładu całkowitej aktywności kluczowych radionuklidów uwolnionych do środowiska w czasie. Dotychczas opracowane modele biosfery pozwalają na określenie dróg prowadzących do narażenia człowieka na promieniowanie, a wielkość dawki promieniowania określić można za pomocą wskaźników konwersji aktywności promieniowania publikowanych przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej (IAEA 2001b).

## LITERATURA

- DĄBROWSKI S., KAPUŚCIŃSKI J., NOWICKI K., PRZYBYŁEK J., SZCZEPAŃSKI A., 2003 — *Metodyka modelowania matematycznego w badaniach i obliczeniach hydrogeologicznych – poradnik*. ISBN 8362662417, Wyd. Ministerstwo Środowiska.
- FINSTERLE S., DOUGHTY C., KOWALSKY M.B., MORIDIS G.J., PAN L., XU T., ZHANG Y., PRUESS K., 2008 — *Advanced Vadose Zone Simulations Using TOUGH* Vadose Zone Journal Vol. 7, No. 2, p. 601–609.
- IAEA 2001a — *Characterization of groundwater flow for near surface disposal facilities* IAEA-TECDOC-1199 Waste Technology Section International Atomic Energy Agency Wagramer Strasse 5 P.O. Box 100 A-1400 Vienna, Austria.
- IAEA 2001b — *Generic Models for Use in Assessing The Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment*. Safety Reports Series No.19. Wagramer Strasse 5 P.O. Box 100 A-1400 Vienna, Austria.
- IAEA 2004a — *Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities* Vol. 1 – Review and enhancement of safety assessment approaches and tools. ISBN 92–0–104004–0 © IAEA.
- IAEA 2004b — *Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities* Volume 2 – Test Cases ISBN 9201040040, IAEA.
- LITTLE R.H. et al. 1996 — *Post-Disposal Safety Assessment of Toxic and Radioactive Waste: Development and Testing of the SACO Methodology and Code*, European Commission Report EUR 16871 EN.
- MALLANTS D., VAN GENUCHTEN M.TH., SIMUNEK J., JACQUES D., SEETHARAM S., 2011 — *Leaching of contaminants to Groundwater*. [In:] Swartjes F. A. (ed) *Dealing with Contaminated Sites: From Theory towards Practical Application* ISBN 978-9048197576.
- NEA OECD 2001 — *Scenario Development Methods and Practice. An evaluation based on the NEA Workshop on Scenario Development*. OECD Publications, Paris France.
- OLDENBURG C.M., PRUESS K., 1996 — *Application of TOUGH2/EOS7R to Modeling of Radionuclide Release from a Low/Intermediate Level Repository under Two-Phase Conditions*. Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory University of California, Berkeley, CA 94720.

RUSSELL A.W., SMITH P.A., MCKINLEY I.G., 2005 — Modelling radionuclide transport in the geological environment: A case study from the field of radioactive waste disposal. [W:] Scott E.M. (ed.) Modelling Radioactivity in the Environment, Elsevier.

ŠIMŮNEK J., van GENUCHTEN M.TH., ŠEJNA M., 2008 — Development and Applications of the HYDRUS and STANMOD Software Packages and Related Codes.

## **METHODOLOGICAL RECOMMENDATIONS IN RADIONUCLIDE MIGRATION MODELLING IN GEOSPHERE IN VICINITY OF LOW AND INTERMEDIATE RADIOACTIVE WASTE REPOSITORIES**

### **ABSTRACT**

Radionuclide migration, hydrogeological model, conceptual modelling, numerical modelling

### **KEY WORDS**

Radionuclide migration modelling in geosphere in vicinity of near surface low and intermediate radioactive waste is one of the most important components of long term safety assessment of this type facility. In addition to the issues related to the numerical modelling of radionuclides migration in geosphere also methodology for safety assessment scenarios involving the determination of radionuclides release into geosphere as well as formulating conceptual models of radionuclides migration and geological and hydrogeological models and implementation of these models for numerical calculations allowing assessment of human exposure to radiation were briefly presented in this article.