

Т.В. Гребенюк, канд. техн. наук,
О.О. Закладний, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-2813-3692
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ

Проаналізовано структуру і вміст радіонуклідів хвостосховищ хімічних підприємств. Досліджені методи контролю радіаційної обстановки. Виконано оцінку поширення радіонуклідів у ґрунтах та підземних водах. Визначені напрямки поширення забруднення підземних вод на основі математичної моделі забруднення підземних вод. Проаналізована методика моделювання гідрогеологічних процесів. Досліджено перенесення радіоактивних речовин від хвостосховища радіоактивних відходів на природно-антропогенні території.

Ключові слова: хвостосховища; радіонукліди; уран; радон; радіоактивність; моделювання.

Вступ.

Україна належить до провідних урановидобувних країн світу. Уранові родовища розташовані в основному в межах Кіровоградської області. За досить низького вмісту урану в рудах, родовища України мають низку особливостей, які забезпечують конкурентну здатність виробленого уранового концентрату:

- великі розміри уранових покладів, що дозволяє застосовувати високопродуктивні системи видобутку;
- висока міцність вмшуючих порід, що дозволяє проходити гірничі виробки без кріплення та проходити очисні блоки великих обсягів;
- невеликі водні притоки до гірничих виробок;
- досить прості заходи радіаційного захисту завдяки невеликому вмісту урану у рудах.

Відомості про розвідані запаси урану, а також їх поповнення та вичерпання, надані WNA, свідчать, що світовий річний видобуток урану становить приблизно 35 – 37 тис. т (близько 55% поточних потреб). Решта цієї сировини поповнюється за рахунок складських запасів (конверсійний уран), проте, за аналізом вже у 2015 році ці додаткові джерела вичерпані. За прогнозами МАГАТЕ, річна потреба АЕС в урановій сировині до 2050 року зростає до 177 тис. т. (середній варіант), або навіть до 283 тис. т. (високий варіант). Навіть при середньому варіанті сумарна потреба ядерної енергетики за 50 років складе 5,35 млн. т. урану.

Основні запаси урану зосереджені в Кіровоградському урановорудному районі (КУРР), оцінювані запаси становлять понад 100 тис. т., з яких більше половини рентабельні; а також у центрально-українському ураново-рудному районі (ЦУРР). Родовища Побузького УРР відпрацьовані в 1990-х роках. В експлуатації перебувають Ватутінське і Мічуринське родовища (КУРР, ЦУРР відповідно), Северинське – в резерві. Деякі родовища перебувають на стадії розвідки [1].

Розроблена і виконана програма радіаційного контролю радіаційно небезпечних об'єктів із дотриманням певних радіаційно-гігієнічних регламентів [2], що мають супроводжувати будь-яку діяльність на цих об'єктах. Оскільки на даний час в Україні є відсутніми національні рекомендації щодо організації і проведення радіаційного моніторингу на об'єктах колишнього уранового виробництва, то для вивчення радіаційного стану колишніх уранових об'єктів у даній роботі використано аналіз.

Мета і завдання

Мета роботи полягає в аналізі математичних моделей, що характеризують гідрогеологічні умови хвостосховищ, аналізують геоміграції радіонуклідів та виконують оцінку фільтраційного виносу забруднюючих радіоактивних речовин у природні водойми. Дослідити процес перенесення радіоактивних речовин з хвостосховищ у природне середовище.

Результати досліджень

Проведені комплексні дослідження та оцінка розповсюдження важких металів та радіонуклідів в компонентах природно-територіальних комплексів в районі впливу накопичувачів радіоактивних відходів уранодобувної та уранозбагачувальної промисловості.

За результатами радіометричного обстеження фізико-хімічних характеристик шламу у хвостосховищах встановлено, що швидкість вертикальної та горизонтальної міграції радіонуклідів значною мірою обумовлена механічними та фізико-хімічними характеристиками середовища (ємність поглинання, склад обмінних катіонів, рН, ефективна пористість, дисперсний склад, форми знаходження

радіонуклідів, швидкість фільтрації та ін.). Використання при моделюванні експериментальних значень відповідних параметрів дає змогу достовірно оцінювати та прогнозувати небезпеку, пов'язану з розповсюдженням радіонуклідів.

Серед основних фізико-хімічних характеристик шламу можна виділити:

- рН;
- щільність твердої фази;
- насипна щільність;
- пористість;
- природна вологість;
- коефіцієнт фільтрації води.

Як відомо, рН середовища значною мірою визначає перебіг окислювально-відновних процесів, що у свою чергу має позначатись на формах знаходження та мобільності радіонуклідів.

Важливим процесом, що обумовлює радонову небезпеку хвостосховищ, є інтенсивність газообміну їхніх внутрішніх шарів з атмосферою (аерація).

Переміщення радону в поровому просторі відбувається завдяки процесам дифузійного й конвективного переносу. Швидкість і глибина аерації, незалежно від механізмів переносу, тісно пов'язані з умовами, що визначають газопроникність середовища – наявність сполучених пор та ступінь їхнього заповнення водою. При 70 %-вому заповненні вільного об'єму ґрунту водою рух повітря в порових каналах практично відсутній. При незначному зменшенні вологості макропори осушуються і газопроникність значно збільшується.

Проаналізовані фільтраційні властивості різних типів хвостосховищ. Для деяких ділянок коефіцієнт фільтрації може бути досить низьким (~ 3 см/добу), що значно збільшує час взаємодії рідкої та твердої фаз. Деякі ділянки хвостосховища можуть відрізнятися високою швидкістю фільтрації (118 см/добу). Отримані результати повинні бути узгоджені з результатами дослідження гранулометричного складу частинок шламу – чим більший внесок у загальну кількість частинок < 1 мкм, тим нижча швидкість фільтрації.

Досліджено методики моделювання гідрогеологічних процесів. На сьогодні існує багато систем моделювання та програмного забезпечення, найбільш поширеними можна вважати – Visual Modflow, Visual Modflow Pro, Feflow, Modflow – Surfcast и т.п., які дозволяють створити тривимірні моделі геофільтрації [3]. Розроблені методики моделювання, орієнтовані на цей клас програм. Технологія моделювання істотно залежить не тільки від вибраного типу програмного забезпечення, а і від принципів схематизації гідрогеологічних умов. Схематизація є важливим етапом моделювання, включаючи в себе як процес геофільтрації так і область. Моделі області геофільтрації відображають зміни в просторі та часі властивостей гідрогеологічного об'єкта, а моделі процесів – закони, якими вони описуються. Програми виконують чисельним методом диференційні рівняння, які імітують процеси.

Методика моделювання хвостосховищ передбачає два етапи: створення регіональної фільтраційної моделі і побудова на її основі гідродинамічної сітки усталеною фільтрації підземних вод (стрічок струму); розрахунок міграції радіонуклідів уранового ряду уздовж стрічок струму підземних вод.

Для моделювання гідрогеологічних умов хвостосховищ проаналізовано [3] та обрано розроблену систему фільтрації - модель на основі програми Visual Modflow Pro. Модель передбачає сталу 3-мірну фільтрацію і має 5 розрахункових шарів (знизу вгору): кристалічні тріщинуваті породи, верхня частина тріщинуватих гранітів і кора вивітрювання, алювіальні піщані відкладення, суглинні ґрунти (на схилі плато), техногенні відкладення - відходи уранового виробництва, насипні ґрунти (фосфогіпс-си, шлаки).

Для моделювання геоміграції радіонуклідів з хвостосховищ використовується програмне забезпечення (ПО) Ecolago (Facilia AB, Швеція) [4]. Програма Ecolago являється ефективним інструментом для рішення систем диференціальних рівнянь на основі використання камерного підходу (аналог розроблен англійськими спеціалістами програм Mascot и Amber). Ecolago призначене для реалізації камерних радіоекологічних моделей, які описуються звичайними диференціальними рівняннями першого порядку. Програма має вбудовану базу даних радіонуклідів і дозволяє автоматично моделювати ланцюжка радіоактивного розпаду.

Модель враховує вертикальну інфільтрацію забруднених порових розчинів з тіла хвостосховища в алювіальних водоносний горизонт і подальший латеральний конвективно-дисперсійний перенос радіонуклідів (з урахуванням сорбції). У розрахунку враховувались всі основні радіонукліди уранового ряду. Математичні деталі методики розрахунку конвективно-дисперсійного перенесення за допомогою Ecolago наведені в [5].

Міграція радіонуклідів у хвостосховищах хімічних підприємств значною мірою визначається параметрами середовища. У зв'язку зі складністю врахування всіх факторів, що визначають сукупність елементарних актів сорбції та десорбції радіонуклідів на компонентах твердої фази, виникає необхідність створення спрощених моделей сорбційної взаємодії. Більшість радіонуклідів можуть затримуватися на твердій фазі за рахунок іонообміну. Інтенсивність цієї взаємодії можна визначити за допомогою

коефіцієнта K_d , який визначає співвідношення концентрації радіонуклідів, що адсорбовані на твердій фазі, та їхньою концентрацією в розчині після того, як система досягла рівноваги. Великі значення K_d означають, що радіонуклід міцно зв'язаний із ґрунтом і його міграція буде повільною, а невеликі – навпаки. Сорбційні параметри для водоносного горизонту прийняті на основі огляду літературних джерел [6, 7] (за аналогією).

Визначення рН водної витяжки зразків проводиться, як правило відповідно до ДСТУ ISO 10390-2001, при співвідношенні в суспензії твердої і рідкої фаз 1:5. Вміст вологи у зразках визначається за стандартною методикою. Бюкси з кришками і відомою масою заповнювались матеріалом хвостосховища і зважувалися з точністю до 0,001 г (А грамів).

Потім зразки висушують при 105 °С протягом 12 год зі знятими кришками. Після сушки бюкси закривають кришками, охолоджують в ексикаторі і зважують (В грамів). Вміст вологи (W,%) можна визначити як:

$$W = \frac{A-B}{B-m} \times 100,$$

де m-маса бюкса з кришкою.

Метод визначення щільності твердої фази шламу базується на стандарті для визначення щільності цементу. Для цього використовується прилад Ле-Шательє, що являє собою скляну колбу з мірною лінійкою. Прилад наповнюється зневодненим гасом до нижньої нульової риски і поміщається в скляний посуд з водою. Насипну щільність зразків шламу можна визначати шляхом утрясання висушених і подрібнених зразків у мірному циліндрі. Утрясання проводиться до припинення зменшення об'єму зразка. Одним з основних параметрів, що впливає на виділення радону з хвостосховищ, є ефективна пористість, яка являє собою сукупність сполучених пор і порожнин, у межах яких можливий рух рідин і газів при коливанні тиску і температури.

Оцінка фільтраційних властивостей хвостосховищ проводиться шляхом визначення коефіцієнта фільтрації (K_f) води в колонках, заповнених шламом із хвостосховищ. У якості фільтрату використовується дистильована вода, як імітатор атмосферних опадів. Вимірювання швидкості фільтрації проводиться після встановлення динамічної рівноваги току води при гідравлічному градієнті=1.

Згідно з [8], експериментальні значення рН води техногенного водоносного горизонту хвостосховищ коливаються в інтервалі 2,5 ÷ 3,2, тому обчислення проводились для рН 2,5 і 3,2. Зміна рН досягається шляхом зміни кількості NH_4^+ у модельній системі.

Результати обчислень, що виконувались для стандартних умов: $T = 25$ °С і $P = 1$ бар показали, що основними мінералами більшості хвостосховищ при рН = 9,8 є плагіоклаз та кварц (рис. 1). У значній кількості представлені оксиди та гідроксиди заліза (загалом до 13 %), у меншій – кальцит, глинисті мінерали та слюди. Аналогічний результат отриманий також для рН = 8,5.



Рисунок 1 – Мінеральний склад матеріалів хвостосховищ хімічних підприємств при рН = 9,8

Оскільки при обчисленнях використовувались усереднені дані щодо хімічного складу мінеральної частини хвостів та складу води техногенного водоносного горизонту хвостосховищ, наведені результати слід трактувати як якісну оцінку основних процесів, що визначають форми знаходження урану та його рухливість в умовах хвостосховищ. Крім того, використаний для моделювання метод базується на припущенні встановлення в системі термодинамічної рівноваги, що в умовах хвостосховищ є маловірогідним.

Виявлено залежність K_d радіонуклідів (^{238}U , ^{230}Th , ^{226}Ra) у хвостосховищах від рН середовища.

Висновки

Проаналізовано існуючі методи моделювання гідрологічних процесів. Досліджено міграцію радіоактивного забруднення та виконано оцінку зміни якості підземних вод, за допомогою математичного моделювання. Дослідження показали, що є перенесення радіоактивних речовин від хвостосховища радіоактивних відходів на природно-антропогенні території, відбувається водоносним шляхом, за допомогою підземних вод.

Встановлено, що істотним джерелом міграції радіонуклідів є не тільки зосереджені в хвостосховищі відходи, а й забруднені породи водоносного горизонту під чашею хвостосховища. Тому вилучення і перепоховання хвостів не дасть значного ефекту з точки зору зменшення виносу радіонуклідів в природні водойма (особливо в кратко- і середньостроковій перспективі). Раціональним підходом може бути консервування хвостів шляхом створення ґрунтового екрану, який мінімізує інфільтрацію атмосферних опадів в тіло хвостосховища і, відповідно, мінімізує забруднення підземних вод.

Список використаної літератури

1. Присяжков, В.А. История Днепропетровского университета [Текст]./ В.А. Присяжков // Видавництво Дніпропетровського держуніверситету,- 1993.- С. 231-240.
2. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку: Закон України від 08.02.2002 р. № 39/95 ВР [Електронний ресурс].- Режим доступу: http://uazakon.com/documents/date_6r/pg_gdwrof/pg2.htm/
3. Рудаков, Д.В. Моделювання в гідрогеології [Текст]: навч. посібник / Д.В. Рудаков. – Д.: Національний гірничий університет, 2011. – 88 с.
4. Ecolego. User Guide [Електронний ресурс] / FACILIA AB, 2011. – 152 р. – Режим доступа: http://ecolego.facilia.se/ecolego/report_objects/pdf/241
5. Ukrainian Centre for Economic & Political Studies [Текст] / Nuclear energy in the world and in Ukraine: state and prospects of development. – 2008. – Vol. 3. – P. 12-16.
6. Недашковский, Ю.С. Высокое напряжение атомной отрасли. Энергетика [Текст] / Ю.С. Недашковский // Итоги года. К.: Экономика, - 2005. - С. 12-14.
7. Радзивілл, А.Я. До геологічних проблем и можливість енергозабезпечення України [Текст] А.Я. Радзивілл // Геолог України. Вип. №4, - 2005. С. 26-32.
8. Камзист, Ж. С. Основы инженерной геоэкологии: Методика эколога-геологических исследований [Текст] / Ж. С. Камзист, А. В. Коваленко. – М., 1991. – С. 113.

Т. Hrebenuk, , Cand.Sc. (Eng.),

O. Zakladniy, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-2813-3692

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

ANALYSIS MODELING OF DISTRIBUTION OF RADIOACTIVE WASTE

Ukraine belongs to the leading uranium-producing countries of the world. Uranium deposits are located mainly within the Kirovograd region. The program of radiation control of radiation hazardous objects with the observance of certain radiation and hygiene regulations, which should accompany any activity on these objects, has been developed and implemented. Studies have shown that the transfer of radioactive substances from the tailings of radioactive waste to natural and human-made territories occurs in aquifers by groundwaters.

The existing methods of modeling of hydrological processes are analyzed. The migration of radioactive contamination was investigated and an estimation of change in the quality of underground waters was performed, using mathematical modeling. Migration of radionuclides in tailing ponds of chemical enterprises is largely determined by the parameters of the environment. The technology of modeling essentially depends not only on the chosen type of software, but also on the principles of schematization of hydrogeological conditions. The use of experimental values of the mechanical and physico-chemical characteristics of the environment in the simulation allows us to reliably assess and predict the dangers associated with the propagation of radionuclides. The method of tailings modeling involves two stages: the creation of a regional filtration model and based on it the construction of a hydrodynamic grid based on groundwater filtration.

The experimental values of the pH of the water of the technogenic aquifer of the tailing dumps are determined. Changes in pH are achieved by changing the amount of NH_4^+ in the model system. The method used to model hydrological processes is based on the assumption of the establishment of a thermodynamic equilibrium system that is unlikely in the conditions of tailing dumps.

It was established that an essential source of migration of radionuclides is not only concentrated in the tailings waste, but also contaminated aquifer breeds under the cup of tailings. Tailing can be a rational approach

by creating a soil screen that minimizes the precipitation of infiltration into the body of the tailing pond and, accordingly, minimizes pollution of groundwaters.

Key words: tailings; radionuclides; Uranus; radon; radioactivity; modeling.

References

1. Prisyakov, V.A. Istoriya Dnepropetrovskogo universiteta [Tekst]./ V.A. Prisyakov // Vidavnistvo DnIpropetrovskogo derzhunIversitetu,- 1993.- S. 231-240.
2. Pro vikoristannya yadernoyi energiyi ta radiatsiyu bezpeku: Zakon UkraYini vId 08.02.2002 r. # 39/95 VR [Elektronniy resurs].- Rezhim dostupu: http://uazakon.com/documents/date_6r/pg_gdwrof/pg2.htm/
3. Rudakov, D.V. Modelyuvannya v gIdrogeologiyi [Tekst]: navch. posIbnik / D.V. Rudakov. – D.: NatsIonalniy gIrnichiy unIversitet, 2011. – 88 s.
4. Ecolego. User Guide [Elektronniy resurs]/ FACILIA AB, 2011. – 152 p. – Rezhim dostupa: http://ecolego.facilia.se/ecolego/report_objects/pdf/241
5. Ukrainian Centre for Economic & Political Studies [Текст] / Nuclear energy in the world and in Ukraine: state and prospects of development. – 2008. – Vol. 3. – P. 12-16.
6. . Nedashkovskiy, Yu.S. Vvisokoe napryazhenie atomnoy otrasli. Energetika [Tekst] / Yu.S. Nedashkovskiy // Itogi goda. K.: Ekonomika, - 2005. - S. 12-14.
7. Radzivill, A.Ya. Do geologIchnIh problem i mozhlivIst energozabezpechennya UkraYini [Tekst] A.Ya Radzivill // Geolog UkraYini. Vip. №4, - 2005. S. 26-32.
8. Kamzist, Zh. S. Osnovy inzhenernoy geoekologii: Metodika ekologo-geologicheskikh issledovaniy [Tekst] / Zh. S. Kamzist, A. V. Kovalenko. – M., 1991. – S. 113.

Т.В. Гребенюк, канд. техн. наук,

О.А. Закладной, канд. техн. наук, доцент, **ORCID 0000-0003-2813-3692**

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

АНАЛИЗ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Проанализирована структура и содержание радионуклидов хвостохранилищ химических предприятий. Исследованы методы контроля радиационной обстановки. Выполнена оценка распространения радионуклидов в почвах и подземных водах. Определены направления распространения загрязнения подземных вод на основе математической модели загрязнения подземных вод. Проанализирована методика моделирования гидрогеологических процессов. Исследовано перенос радиоактивных веществ от хвостохранилищ радиоактивных отходов на природно-антропогенные территории.

Ключевые слова: хвостохранилища; радионуклиды; уран; радон; радиоактивность; моделирования.

Надійшла 07.02.2018

Received 07.02.2018