

П. Г. Круковський, В. С. Олійник

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, Київ, 03057, Україна

Вибір моделей поширення радіоактивних аерозолів усередині й зовні нового безпечного конфайнмента Чорнобильської АЕС

Ключові слова:
радіоактивні аерозолі,
поширення радіації,
ЧАЕС,
моделювання,
термогазодинамічний стан

Розглядаються підходи для вирішення актуального завдання одночасного моделювання поширення радіоактивних аерозолів (РА) як усередині відносно малого об'єму нового безпечного конфайнмента (НБК) Чорнобильської АЕС за допомогою внутрішньої моделі, так і зовні в навколишнє середовище біля НБК відносно великого об'єму за допомогою зовнішньої моделі для контролю та можливості мінімізації викидів РА. Внутрішня й зовнішня моделі суттєво відрізняються, оскільки РА всередині НБК розповсюджуються конвективними потоками повітря дуже повільно й осідають на площі приблизно $0,03 \text{ км}^2$, а зовні на проммайданчику Чорнобильської АЕС інтенсивно розповсюджуються швидкими різнонаправленими вітровими потоками й осідають на значній площі приблизно 3 км^2 . Звідси витікають суттєві відмінності у вимогах до одночасної взаємодії внутрішньої та зовнішньої моделей поширення РА в режимі реального часу. Проведено аналіз трьох основних комбінацій моделей поширення РА — тривимірні внутрішня та зовнішня CFD моделі, внутрішня CFD модель, зовнішні моделі шлейфа Гаусса або дисперсії частинок Лагранжа.

Вступ

Об'єктом дослідження є новий безпечний конфайнмент (НБК), збудований над зруйнованим реактором та об'єктом «Укриття» Чорнобильської АЕС (рис. 1), який є спорудою, що захищає населення, персонал і навколишнє середовище від радіоактивного пилу під час вилучення радіоактивних матеріалів. Для цього структурна частина НБК (див. рис. 1, поз. 1) усередині та зовні обшита двома металевими оболонками 2 та 3 для забезпечення довготривалого опору корозії протягом 100-річного терміну експлуатації шляхом підтримання показника вологості не більше 40 %.

Одночасно з цим під внутрішньою оболонкою в основному об'ємі 3 підтримується негативний тиск для запобігання виходу РА за межі НБК як через щілини та зазори між стінами НБК і будівельними

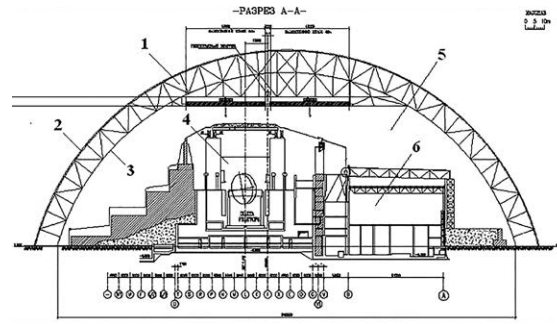
конструкціями, так і через самі оболонки, оскільки НБК не є повністю герметичним. Для цього спеціальна система вентиляції нагнітає в кільцевий простір осушене повітря, що просочується через щілини внутрішньої оболонки в основний об'єм і далі витягується через фільтри за межі НБК (так званий організований та контрольований викид). Загальна площа цих щілин внутрішньої оболонки оцінюється в 6 м^2 . Така площа оцінена і для протічок повітря з РА в нижніх частинах стін НБК, що примикають до будівельних конструкцій без фільтрації (так званий неорганізований і неконтрольований викид). Напрямок і рівень витрат таких викидів визначається напрямком і швидкістю вітру, що обдуває НБК, а також режимом роботи системи вентиляції [1].

Слід зазначити, що контроль неорганізованих викидів повітря з РА за межі НБК можливий лише

© П. Г. Круковський, В. С. Олійник, 2022



а



б

Рис. 1. НБК (а) та схема зруйнованого реактора, об'єкт «Укриття» та НБК у поперечному перерізі (б): 1 — сталеві конструкції та кільцевий простір НБК; 2 — зовнішня оболонка; 3 — внутрішня оболонка; 4 — об'єкт «Укриття» та зруйнований реактор; 5 — основний об'єм НБК; 6 — машинний зал

шляхом моделювання газодинамічного та радіаційного стану НБК [1, 2]. Крім цього, на сьогодні стоїть важливе завдання постійного аналізу та контролю радіаційного стану не тільки всередині НБК, але одночасно й на промайданчику розміром приблизно 3×3 км біля НБК із розташованою на ньому інфраструктурою ще трьох енергоблоків та інших виробничих будівель і споруд.

Для цього розглядаються підходи одночасного моделювання поширення РА як усередині відносно малого основного об'єму НБК (мікрорівень близько $1,5$ млн м^3) за допомогою внутрішньої моделі, так і зовні в навколишнє середовище біля НБК на промайданчик Чорнобильської АЕС відносно великого об'єму (локальний рівень близько 20 км 3) за допомогою зовнішньої моделі для постійного моніторингу й можливості мінімізації викидів РА, що і є метою цієї роботи.

Внутрішня та зовнішня моделі суттєво відрізняються між собою, оскільки РА всередині НБК розповсюджуються конвективними потоками повітря дуже повільно (швидкість $0-0,3$ м/с) і значним осіданням на площі приблизно $0,03$ км 2 , а зовні біля НБК інтенсивно розповсюджуються різнонаправленими вітровими потоками (швидкість $0-15$ м/с) з меншим осіданням на значній площі приблизно 3 км 2 .

На сьогодні проведено дослідження, що фокусувались на дослідженні таких аспектів проблеми:

- 1) внутрішній — моделювання сценаріїв поширення РА всередині НБК за різних режимів роботи та виконуваних робіт з метою встановити допустиму тривалість роботи персоналу всередині [3, 4];
- 2) зовнішній — моделювання сценаріїв поширення РА за межами НБК, наприклад, вплив погодних умов на концентрацію РА в повітрі [5] або аналіз аварійних сценаріїв поширення РА на великі відстані до 1000 км [6].

Проте такі підходи окремо не вирішують проблему викидів РА за межі НБК, оскільки вони є ізольованими, а контроль та мінімізація протічок РА в навколишнє середовище за допомогою моделювання можливі лише через спряження внутрішнього й зовнішнього аспектів проблеми, що вивчається в цій роботі.

Особливості об'єкта дослідження

Щоб порівняти підходи до моделювання поширення РА, необхідно виділити основні особливості об'єкта, якими неможливо нехтувати (спростити) під час моделювання. Відповідно, якщо підхід не здатен врахувати всі особливості або не забезпечує необхідної точності розрахунку, враховуючи ці особливості, такий підхід не може бути прийнятий для моделювання поширення РА на промисловому об'єкті.

Для зручності особливості об'єкта розділені на зовнішні (навколо НБК) і внутрішні (усередині НБК). Проте основна особливість об'єкта — це обмежена взаємозалежність внутрішніх і зовнішніх процесів: зовнішні умови впливають на газодинамічні процеси всередині, які, зрештою, визначають рівень витоків РА назовні. Тому під час вибору підходу до моделювання важливо забезпечити зв'язок між зовнішньою та внутрішньою моделями.

Вимоги до моделі поширення РА зовні НБК:

- 1) низька висота джерела ($10 \dots 60$ м);
- 2) форма джерела РА — вузькі довгі щілини (ширина до $0,01$ м, довжина 250 м);
- 3) навколо НБК велика кількість споруд (до 75 м висотою);
- 4) область особливого практичного інтересу дослідження — поверхня промайданчика (3×3 км) і дахи енергетичних блоків; габарити області дослі-

дження визначаються з достатності для дослідження цих поверхонь;

5) можливість дослідження сухого осадження РА на поверхні проммайданчика;

6) складна зовнішня геометрія НБК — півциліндр із прибудовами на торцях західної і східної стін НБК;

7) нестационарні погодні умови (середній часовий масштаб змін 30 хв);

8) вхідні метеорологічні параметри, необхідні для розрахунку (температура, абсолютна вологість, швидкість і напрямок вітру);

9) просторова роздільність результатів розрахунків поля концентрації (проміжок між розрахунковими точками в просторі орієнтовно на рівні 5–10 м залежно від розмірів будівель і відстані між ними);

10) вимога до тривалості одного циклу розрахунків (проміжок між розрахунковими точками орієнтовно 1 год часу розрахунку).

Вимоги до моделі поширення РА усередині НБК:

1) середня швидкість повітря усередині 0–0,3 м/с під дією градієнта температури $\approx 0,1$ °С/м;

2) внутрішній об'єм 1,5 млн м³ (235×75×150 м, виключаючи внутрішні будівлі та об'єкт «Укриття»);

3) залежність характеру руху повітря від пори року (температурна конвекція);

4) напівгерметичний об'єм (вплив зовнішніх умов на мікроклімат усередині);

5) тиск усередині НБК менший за тиск зовні (–5...–10 Па), що мінімізує неконтрольовані витоки;

6) просторова роздільність результатів розрахунків поля концентрації (CFD-моделі з нерівномірними розмірами комірок від 0,1 м біля поверхонь теплообміну до 3–4 м у повітряному просторі основного об'єму НБК);

7) тривалість одного циклу розрахунків має дозволяти утилізацію моделі в режимі онлайн-моніторингу стану НБК для автоматизації керування системою вентиляції. Тобто швидкість моделювання має бути орієнтовно 4 год моделі / 1 год реального часу.

Також до вимог, що стосуються обох моделей, можна віднести параметри, якими моделі мають обмінюватись. Динаміка повітря усередині залежить від умов зовні (напрямку, швидкості повітря та температури), тому для внутрішнього завдання важливо передати статичний тиск, який створює повітря зовні на стінки НБК, а також вологість і температуру повітря, що потрапляє всередину через нещільності. Після цього внутрішня модель передає як параметр рівень витікання РА через нещільності в структурі НБК.

Підходи в моделюванні поширення РА

Залежно від потреб, що вирішуються дослідженням руху РА в межах певної території, класифікують 4 основні масштаби в моделюванні [7]: локальний (до 20 км від джерела), мезомасштаб (від 20 до 200 км), регіональний масштаб (200...2 000 км), трансграничний масштаб (>2 000 км). Промислові об'єкти (і НБК) відповідають локальному масштабу моделювання. Для моделювання поширення РА в закритому об'ємі (усередині НБК) цю класифікацію можна доповнити мікрорівнем — найменший масштаб моделювання руху РА для дослідження поведінки РА в обмеженому об'ємі (наприклад, у межах окремих приміщень) або для верифікації моделей поширення, що використовуються на вищих рівнях або дослідження конкретних частково ізольованих областей у межах більшої моделі, які становлять ключовий інтерес для вивчення.

Для кожного масштабу характерний свій підхід у моделюванні: типи граничних умов, моделі перенесення маси та енергії, рівень дискретизації області дослідження, моделі поширення РА тощо. У загальному випадку поле концентрації РА розраховується за допомогою тривимірного нестационарного рівняння турбулентної дифузії. Початкові та граничні умови для нього визначаються характеристиками джерела викиду, властивостями аерозолів, рельєфом місцевості та геометрією будівель в області розрахунків. Залежно від конкретного завдання рівняння може бути розв'язано аналітично для найпростіших випадків або розв'язано чисельно. У наступних розділах охарактеризовано найбільш популярні підходи до моделювання й обговорюється їхнє застосування щодо об'єкта НБК на локальному та мікрорівнях.

Реалізація моделювання поширення РА на локальному рівні. Ці моделі широко використовуються метеорологами, що дає змогу досліджувати різні сценарії викидів забруднюючих речовин за різних погодних умов. При цьому просторова або часова дискретизація можуть бути підлаштовані під конкретну проблему, хоч діапазон вибору масштабу досить обмежений. Через великий масштаб області дослідження реалізація цих моделей залежить від обчислювальних можливостей процесорів, тому на сьогодні можна виділити дві основні моделі.

1. Модель шлейфа Гаусса (Gaussian Plume Model) — досі лишається популярною моделлю, в основі якої лежить проста формула, що описує тривимірне поле концентрації РА, створене точко-

вим джерелом за стаціонарних метеорологічних умов і викидів [8]. Для оцінки концентрації забруднюючих речовин у повітрі використовується двовимірний нормальний розподіл, що зосереджений навколо головної осі потоку, що сама по собі визначається ефективною висотою джерела, швидкістю та напрямком вітру на цій висоті.

Переваги моделі шлейфа Гаусса в тому, що вона досить проста і не вимагає значних обчислювальних потужностей.

Недоліки моделі:

лише точкові джерела та лише один розмір частинок можуть бути змодельовані за один цикл розрахунку;

непряме врахування сухого осідання, що моделюється опосередковано шляхом зменшення потужності джерела;

модель не призначена для дослідження густо забудованих територій, у яких змінюється поле вітру й турбулентності;

швидкість і напрямок вітру постійні на всій ділянці моделювання.

Таким чином, використання моделі шлейфа Гаусса обмежене і вона не може застосовуватись для моделювання проблем зі щільною забудовою і низькою висотою джерела. Тому такий підхід непридатний для моделювання поширення РА навколо НБК, оскільки нездатний прямо врахувати особливості місцевості. Для моделювання поширення РА всередині будівель ця модель не призначена.

Розроблено низку моделей поширення РА, які окремо вирішують недоліки моделі шлейфа Гаусса, проте не отримали популярності. До таких можна віднести модель вищого порядку — мезомасштабну модель атмосферного перенесення LEDI [6]. Вона враховує нестаціонарність погодних умов, різні типи джерела та поверхні. Для врахування впливу турбулентності, зміни вітру з висотою і залежно від рельєфу місцевості застосовується низка емпіричних залежностей. Модель демонструє хорошу відповідність з експериментальними даними на великому масштабі області дослідження і дозволяє досліджувати сценарії перенесення забруднюючих речовин на великі відстані. Проте вона непридатна для локальних масштабів, оскільки використання усереднених емпіричних залежностей і коефіцієнтів зменшує її точність на масштабі промислових об'єктів, де великий вплив на характер поширення вітру має забудова.

2. Модель дисперсії частинок Лагранжа (Lagrangian particle dispersion model) — новий стандарт у мо-

делюванні поширення забруднюючих речовин, що прийнятий положенням Міністерства захисту довкілля Німеччини [7]: модель дисперсії частинок Лагранжа замінює раніше застосовану модель шлейфа Гаусса, яку було дозволено використовувати до кінця 2020 р.

Ця модель вирішує недоліки, що існували в моделі шлейфа Гаусса [9]. Зокрема, відмінність полягає в прямому моделюванні динаміки частинок, що генеруються джерелом, і траєкторія руху кожної залежить від взаємодії з вітром, поверхнями і навіть однієї з одною. Швидкість вітру може бути змінною, як і розміри частинок, і швидкість їхнього генерування.

Щоб отримати поле вітру та турбулентності в межах усієї області моделювання, використовується або модель примежового шару у випадку горизонтально однорідного рельєфу, або діагностична модель поля вітру TALdia в іншому випадку. Остання значно розширює область застосування та точність розрахунку під час моделювання ділянки зі складним рельєфом або забудовами. Діагностична модель поля вітру в основі має бібліотеку полів вітру для кожного класу стійкості та заданого набору напрямків вітру та турбулентності, що моделюється на основі емпіричних припущень. Під час подальшого моделювання дисперсії РА для кожного часового кроку або статистичної ситуації вибираються два найближчі попередньо обчислені поля. Вони інтерполюються таким чином, щоб швидкість і напрямок вітру інтерпольованого поля вітру відповідали заданому одному з метеорологічних вхідних файлів. Але змодельовані діагностичні поля вітру призначені не для реалістичного представлення окремих метеорологічних ситуацій, а для того, щоб дати оцінку середньої поведінки. Таким чином, такі ефекти, як зворотні течії або завихрення на підвітряній стороні будівель, або проходження в аеродинамічній трубі в орографічно структурованій місцевості, апроксимуються моделлю поля вітру. Для цього потоки в областях за будівлями або за крутим рельєфом спочатку параметризуються з реверсивним потоком як початковим полем вітру. Після застосування до цього різнонаправленого поля швидкості масово-узгодженої моделі (mass-consistent diagnostic wind model — основна модель TALdia) генеруються підвітряні вихори.

На рис. 2 ілюструється різниця в представленні поширення аерозолів у моделі шлейфа Гаусса і дисперсії частинок Лагранжа [10]. Модель шлейфа Гаусса

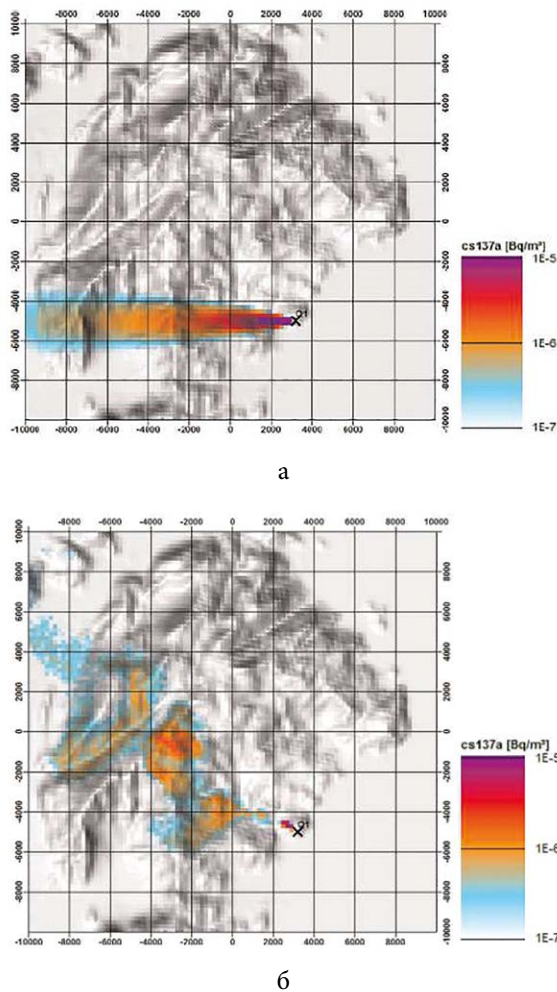


Рис. 2. Візуалізація моделювання поширення частинок у моделі шлейфа Гаусса (а) і в моделі дисперсії частинок Лагранжа (б) в орографічно структурованій місцевості [9]

не враховує зміну напрямку вітру, що значно обмежує її область застосування.

Тому модель дисперсії частинок Лагранжа є пріоритетною для моделювання поширення РА навколо НБК. Проте, як і модель шлейфа Гаусса, модель дисперсії частинок Лагранжа непридатна для моделювання поширення РА всередині будівель через відсутність характерних граничних умов (на прикладі комп'ютерної програми моделювання ARTM [9]): інтерфейсів, які б симулювали приточну вентиляцію, оболонку НБК з дрібними отворами тощо. Крім того, діагностична модель поля вітру розроблена під сценарії зовнішніх умов, для яких нехарактерне домінування вільної конвекції в русі мас повітря.

Реалізація моделювання поширення РА на мікрорівні. Обмеження діагностичної моделі поля вітру і визначають обмеження моделі дисперсії частинок Лагранжа для використання на мікрорівні або все-

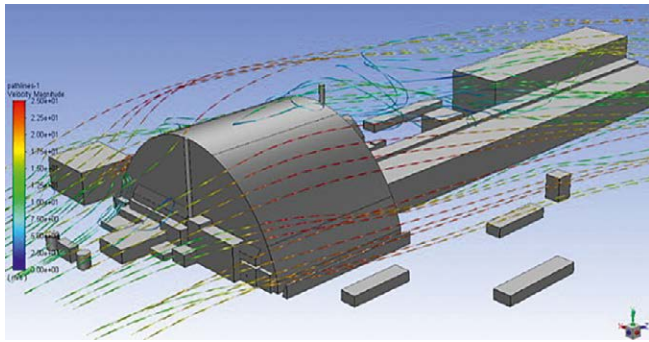
редині будівель: використання бібліотек замість прямого розв'язку рівнянь потоку не дозволить досліджувати ділянки зі складною геометрією на малому масштабі та умовами, що не подібні до метеорологічних умов на відкритому просторі.

Основна ж відмінність у моделюванні потоку в закритому об'ємі й у навколишньому середовищі — це менші градієнти швидкості, більший вплив вільної конвекції та вищий рівень взаємодії потоку з поверхнями малих характерних розмірів. Отже, така модель не може застосовуватись для дослідження поширення РА всередині НБК.

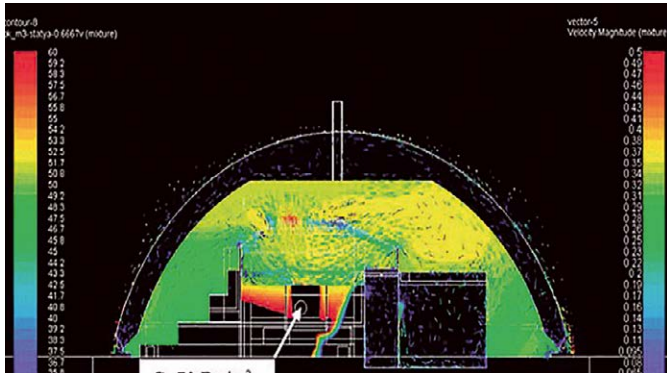
Популярним підходом моделювання поширення РА на локальному й мікрорівнях є CFD моделі, що реалізуються в пакетах моделювання (наприклад, Ansys Fluent, OpenFoam CFD тощо). Чисельний розв'язок рівнянь потоку дає достовірне поле статичного тиску на поверхні НБК, швидкості й температури вітрових потоків на будь-якому прийнятному масштабі, на основі якого можна вирішувати додані рівняння поширення РА. На відміну від розглянутих підходів моделювання поширення РА на локальних рівнях CFD моделі не реалізують повністю моделі поширення РА для окремих сценаріїв (залежно від типу поверхні, типу частинок, тепловологічного стану тощо), проте містять необхідні інструменти для реалізації конкретних моделей ресуспензії та осідання РА у вигляді багатофазних моделей перенесення.

Наприклад, ANSYS FLUENT для моделювання поширення твердих часток у повітрі пропонує модель дисперсії частинок Лагранжа або багатофазну модель species transport, в якій тверді частинки переносяться дифузиею або разом з потоком у вигляді другої фази повітря з відмінними від основної фази властивостями (густина, теплоємність, в'язкість). Застосування частинок Лагранжа краще відповідають сценарію поширення РА всередині НБК і дослідження викидів назовні через те, що враховують взаємодію зі стінками, проте потребують більших обчислювальних ресурсів, що зменшить швидкість моделювання (вимога > 4 год симуляції / 1 год реального часу). Тому перевага надається моделі species transport, доповненої рівняннями, що описують взаємодію досліджуваного типу РА зі стінками та з потоком [11, 12]. Вибір, інтеграція та верифікація достовірності моделей поширення РА становить основну проблему моделювання на мікрорівні.

Хоча використання CFD моделей для дослідження зовнішнього поширення РА можливе, воно не є доцільним:



а



б

Рис. 3. Лінії току зовні НБК і проммайданчика Чорнобильської АЕС при вітровому обтіканні (а) і типовий CFD аналіз розподілу концентрації РА всередині НБК за умов вилучення паливно-активних матеріалів зі зруйнованого реактора (б)

- 1) зовнішні розміри області дослідження значно обмежені обчислювальними потужностями;
- 2) відсутність спеціалізованих та оптимізованих модулів для розрахунку поширення РА — усі моделі поширення РА необхідно інтегрувати та верифікувати за різних погодних сценаріїв і на різних типах місцевості;
- 3) відсутність прямої інтеграції моделі з кліматичними даними місцевості.
- 4) Наведені вище висновки підтверджуються роботами [13, 14], у яких CFD моделі застосовувались для аналізу розповсюдження РА всередині НБК і лінії току повітря зовні НБК (рис. 3). Об'єднання моделей, особливо зовнішньої, не дозволяє використання їх у постійно діючому моніторингу і швидкому виборі шляхів мінімізації викидів РА внаслідок потреби значних розрахункових ресурсів.

Тому для моделювання внутрішньої задачі перевага надається CFD моделі, зовнішньої задачі — моделі дисперсії частинок Лагранжа. Щоб врахувати вплив зовнішніх умов на внутрішні процеси і резуль-

туючі викиди РА назовні, внутрішня і зовнішня моделі повинні обмінюватись між собою результатами моделювання. Послідовність обміну повинна йти від внутрішньої до зовнішньої моделі, оскільки НБК є джерелом РА, а вплив вітрового тиску на внутрішні процеси в НБК у зворотному напрямку від зовнішньої моделі.

Одним з варіантів забезпечити це є дослідження можливих розподілів тиску по поверхні НБК при різних кліматично-вітрових умовах і передача «карт тиску» у внутрішню задачу, де рівень потрапляння/витікання повітря залежить від різниці тиску зовні і всередині НБК.

У цій роботі не розглядаються моделі зосереджених параметрів (1-D), оскільки вони непридатні для незалежного дослідження як зовнішньої, так і внутрішньої задачі. 1-D моделі мають бути валідовані на моделях вищої дискретизації, якими є CFD моделі. Проте 1-D моделі є перспективними для інтеграції розроблених моделей у моніторинг стану об'єкта та автоматизації роботи обладнання підтримки мікроклімату всередині НБК на основі технології цифрових двійників [15, 16].

Висновки

1. Розглянуто три основні підходи в моделюванні поширення РА, два з яких придатні для дослідження виключно зовнішнього поширення.
 2. Виділено основні особливості НБК, що мають бути враховані під час моделювання внутрішнього й зовнішнього поширення РА.
 3. Для зовнішньої задачі модель дисперсії частинок Лагранжа задовольняє вимоги до моделі, у той час як модель шлейфа Гаусса не враховує деякі особливості об'єкта дослідження.
 4. Особливості внутрішнього моделювання НБК не дозволяють використовувати інші моделі поширення, крім CFD. У свою чергу CFD модель має бути інтегрована з моделями поширення РА (сухе осідання, ресуспензія, дифузія тощо). Проте після валідації можливий перехід на 1-D моделі, які є легшими і зручними для подальшої інтеграції в систему керування НБК.
 5. Запропоновано реалізацію зв'язку між зовнішньою і внутрішньою моделями поширення РА.
- Наступними кроками в цій роботі є вибір і верифікація математичних моделей поширення РА всередині НБК та аналіз впливу механізмів поширення РА всередині на викиди назовні.

Список використаної літератури

1. Новый безопасный конфайнмент Чернобыльской АЭС (расчетно-экспериментальный анализ при проектировании и эксплуатации): монография / П. Г. Круковський, М. А. Метель, Д. И. Скляренко [и др.]; под ред. П. Г. Круковского, В. А. Краснова, В. П. Сулимова. — Киев : ООО «Франко Пак», 2019. — 300 с.
2. Аналіз неорганізованого повітрообміну Нового Безпечного Конфайнменту з оточуючим середовищем (попередні результати моделювання за експлуатаційними даними) / П. Г. Круковський, Д. С. Скляренко, Є. В. Дядюшко, С. О. Кондратенко // 36. матеріалів V Міжнар. конф. в режимі онлайн «Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики і відновлення навколишнього середовища», INUDECО 2020 (27–29 квітня 2020 р., м. Славутич, Україна). — С. 109–117.
3. Батій В. Г. Динаміка зміни концентрації радіоактивних аерозолів під час вилучення паливовміщуючих матеріалів з об'єкта «Укриття» / В. Г. Батій, А. О. Сізов // Ядерна та радіаційна безпека. — 2015. — № 4. — С. 41–44.
4. Батій В. Г. Математическое моделирование процесса распространения радиоактивных аэрозолей внутри радиационно-опасных объектов / В. Г. Батій, В. В. Егоров, Ю. И. Рубежанский // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. — 2007. — Вип. 7. — С. 55–61.
5. Батій В. Г. Расчет концентрации радиоактивных аэрозолей вблизи объекта «Укрытие» на основе уточненных компьютерных моделей / В. Г. Батій, В. В. Егоров, Ю. И. Рубежанский // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. — 2006. — Вип. 4. — С. 69–75.
6. Талерко Н. Н. Прогнозирование последствий аварийных выбросов из объектов атомной энергетики с помощью мезомасштабной модели атмосферного переноса LEDI / Н. Н. Талерко, Е. К. Гаргер, А. А. Ключников // Доповіди Національної академії наук України. — 2010. — № 12. — С. 74–79.
7. The utilization of real time models as a decision aid following a large release of radionuclides into the atmosphere. IAEA-TECDOC-733. — Vienna : IAEA, 1994.
8. Zannetti P. Gaussian models / P. Zannetti // AirPollution Modeling. — Boston, MA : Springer, 1990. — P. 141–183.
9. Hanfland R. The Lagrangian Atmospheric Radionuclide Transport Model (ARTM) — development, description and sensitivity analysis / R. Hanfland, M. Pattantyús-Ábrahám, C. Richter, D. Brunner, C. Voigt // Air Quality, Atmosphere & Health. — 2022. — <https://doi.org/10.1007/s11869-022-01188-x>.
10. Richter C. State of the art atmospheric dispersion modelling: should the Gaussian plume model still be used? / C. Richter // Kerntechnik. — 2016. — Vol. 81. — P. 559–564.
11. Giardina M. A new approach for modeling dry deposition velocity of particles / M. Giardina, P. Buffa // Atmospheric Environment. — 2018. — Vol. 180. — P. 11–22.
12. Stempniewicz M. M. Comparison of several resuspension models against measured data / M. M. Stempniewicz, E. M. J. Komen // Nuclear Engineering and Design. — 2010. — Vol. 240 (6). — P. 1657–1670.
13. CFD-анализ и прогнозирование распространения радиоактивных аэрозолей при эксплуатации нового безопасного конфайнмента / М. А. Метель, П. Г. Круковський, Д. И. Скляренко, А. С. Полубинский // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. — 2019. — Вип. 32. — С. 86–92.
14. Скляренко Д. Модель вітрового обтікання та розподілу тисків на поверхнях нового безпечного конфайнмента ЧАЕС / Д. Скляренко, П. Круковський, Є. Дядюшко // 36. матеріалів VII Міжнар. конф. «Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики і відновлення навколишнього середовища», INUDECО 2022 (26–28 квітня 2022 р., м. Славутич, Україна). — С. 89–93.
15. Цифровой двойник — CADFEM CIS // МЦД. Моделирование и цифровые двойники. — Режим доступа: <https://www.cadfem-cis.ru/service/digital-twin>.
16. CFD-модель как цифровой двойник радиационного состояния нового безопасного конфайнмента Чернобыльской АЭС / П. Г. Круковський, Е. В. Дядюшко, В. О. Гарин [и др.] // Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). — 2020. — № 4. — С. 54–62.

P. G. Krukovskii, V. S. Oliinyk

Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine

Selection of Radioactive Aerosol Distribution Models Inside and Outside the New Safe Confinement of the ChNPP

The New Safe Confinement (NSC) is a facility that protects the environment from radioactive aerosols (RA) during the extraction of radioactive materials. Howev-

er, it is not able to provide complete insulation of the internal volume, therefore, to reduce the damage. It is necessary to use auxiliary means, such as ventilation, a special microclimate inside, etc., but this reduces, not eliminates RA leaks. The paper considers approaches for control and the possibility of minimizing RA emissions by simultaneous modeling of the distribution of RA both inside a relatively small volume of the NSC of the Chernobyl NPP (ChNPP) using an internal model, and in the vicinity of the NSC with the help of an external model. The internal and external models are significantly different because RA inside the NSC are distributed by convective air currents very slowly and settle on an area of approximately 0.03 km², while outside of the ChNPP industrial site they are intensively distributed by fast multidirectional wind currents and settle on a significant area of approximately 3 km².

This leads to significant differences in the requirements to internal and external models. Differences were found in such categories as parameters of RA source, topology and dimensions of simulation volume, time step for transient simulation, computation speed requirements, spatial resolution of the mesh etc. Three most popular approaches of RA distribution modeling were analyzed — three-dimensional internal and external CFD models, external models of the Gaussian plume and dispersion of Lagrangian particles. Each has an advantage in some categories and disadvantages in others, based on this trade-off, the suitability of the models is judged. Another important requirement is inside-outside models integration with the following communication scenario: outside model is to provide pressure map on the NSC exterior shell at different weather conditions; inside model is to calculate RA generation rate and distribution to holes (leaks in the NSC structure); with known RA source at the leaks, outside model assesses RA deposition on the surface of interest (industrial site).

Keywords: radioactive aerosols, radiation propagation, Chernobyl nuclear power plant, modeling, thermogasodynamic state

References

1. Krukovsky P. G., Metel M. A., Sklyarenko D. I. (2019). *Novyi bezopasnyi konfaynment Chernobyl'skoy AES (raschetno-eksperimental'nyi analiz pri proyektirovanii i ekspluatatsii)* [New Safe Confinement of the Chernobyl NPP (calculation and experimental analysis in design and operation)]. Chernobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 300 p. (in Rus.)
2. Krukovsky P. G., Sklyarenko D. S., Dyadyushko Ye. V., Kondratenko S. O. (2020). Analiz neorhanizovanoho povitroobminu Novoho Bezpechnoho Konfaynmentu z otochuyuchym seredovyschem (poperedni rezul'taty modelyuvannya za ekspluatatsiynymi danymi) [Analysis of unorganized air exchange of the New Safe Confinement with the surrounding environment (preliminary simulation results based on operational data)]. Proceedings of the *V International Conference on Nuclear Decommissioning and Environmental Recovery, INUDECO 2020 (Slavutych, Ukraine, April 27–29, 2020)*, pp. 109–117. (in Ukr.)
3. Batiy V. G., Sizov A. O. (2015). [The dynamics of changes in the concentration of radioactive aerosols during the extraction of fuel-containing materials from the Shelter object]. *Nuclear and Radiation Safety*, vol. 4 (68), pp. 41–44. (in Ukr.)
4. Batiy V. G., Yehorov V. V., Rubezhanskiy Yu. I. (2007). [Mathematical modeling of the process of propagation of radioactive aerosols inside radiation hazardous objects]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chernobyl*, vol. 7, pp. 55–61. (in Rus.)
5. Batiy V. G., Yehorov V. V., Rubezhanskiy Yu. I. (2006). [Calculation of the concentration of radioactive aerosols near the Shelter object based on refined computer models]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chernobyl*, vol. 4, pp. 69–75. (in Rus.)
6. Talerko N. N., Garger E. K., Klyuchnikov A. A. (2010). [Prediction of the consequences of accidental releases from nuclear power facilities using the LEDI mesoscale model of atmospheric transport]. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, vol. 12, pp. 74–79. (in Rus.)
7. The utilization of real time models as a decision aid following a large release of radionuclides into the atmosphere. IAEA-TECDOC-733. Vienna: IAEA, 1994.
8. Zannetti P. (1990). *Air Pollution Modeling*. Boston, MA: Springer, pp. 141–183.
9. Hanfland R., Pattantyús-Ábrahám M., Richter C., Brunner D., Voigt C. (2022). The Lagrangian Atmospheric Radionuclide Transport Model (ARTM) — development, description and sensitivity analysis. *Air Quality, Atmosphere & Health*. doi.org/10.1007/s11869-022-01188-x.
10. Richter C. (2016). State of the art atmospheric dispersion modelling: should the Gaussian plume model still be used? *Kerntechnik*, vol. 81, pp. 559–564.
11. Giardina M., Buffa P. (2018). A new approach for modeling dry deposition velocity of particles. *Atmospheric Environment*, vol. 180, pp. 11–22.

12. Stempniewicz M. M., Komen E. M. J. (2018). Comparison of several resuspension models against measured data. *Nuclear Engineering and Design*, vol. 240 (6), pp. 1657–1670.
13. Metel M., Krukovskyi P. (2019). [CFD analysis and prediction of the spread of radioactive aerosols during the operation of a New Safe Confinement]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 32, pp. 86–92. (in Rus.)
14. Sklyarenko D. (2022). [Model of wind flow and pressure distribution on the surfaces of the New Safe Confinement of the ChNPP]. *Proceedings of the VII International Conference on Nuclear Decommissioning and Environmental Recovery, INUDECO 2022 (Slavutych, Ukraine, April 26–28, 2020)*, pp. 89–93. (in Ukr.)
15. [Modeling and digital twins]. CADFEM CIS. Available at: <https://www.cadfem-cis.ru/service/digital-twin>. (in Rus.)
16. Krukovskyi P. (2020). [CFD-model as a digital twin of the radiation state of the New Safe Confinement of the Chornobyl NPP]. *Problems of Atomic Science and Technology*, vol. 4, pp. 54–62. (in Rus.)

Надійшла 06.10.2022

Received 06.10.2022