

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ ВИКИДУ ПРИ ПОДІЯХ ІЗ РОЗЛИВОМ РАДІОАКТИВНИХ СЕРЕДОВИЩ

Abstract. This paper is focused concerning issue of radiation impact modelling in terms of liquid radioactive material spills. Mathematical model of the source term formation for such type of the event as well as design basis are represented.

Вступ

На сьогодні в Україні головним напрямом теорії та практики забезпечення безпечної експлуатації АЕС є вирішення комплексних питань щодо мінімізації рівня ризику. При цьому, застосування програмних засобів оцінки наслідків аварійних викидів з радіаційно небезпечних об'єктів сприяє вирішенню таких питань як: мінімізація радіаційного впливу на населення, персонал та навколишнє середовище з урахуванням соціальних та економічних факторів (принцип ALARA), відповідно до закону України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку», а також, Норм радіаційної безпеки НРБУ-97, аналіз порушень нормальної експлуатації, проектних та пізніх фаз запроектованих аварій АЕС в рамках проектних обґрунтувань експлуатуючої організації та оцінок впливу на навколишнє середовище, експертна оцінка даних звітів з аналізу безпеки відповідно до вимог [3], розробка імовірнісного аналізу безпеки 3-го рівня, аварійне реагування на радіаційні аварії у реальному часі.

За результатами проведення імовірнісного аналізу безпеки 1-го та 2-го рівнів для енергоблоків АЕС України та введення вимог НРБУ-97/Д-2000 [1] щодо потенційного опромінення населення з'явилась потреба у більш реалістичному та прецизійному моделюванні таких подій на АЕС як порушення нормальної експлуатації (події, частота реалізації яких може перевищити 10^{-2} 1/рік). До таких подій віднесено аварії із розливом рідких радіоактивних середовищ (РРС). Первинний досвід щодо оцінок радіаційного впливу для аварій такого типу для АЕС України (~2010-2015рр.) базувався на спрощених підходах та вихідних параметрах із великим ступенем невизначеностей.

Одна з представницьких подій, що пов'язана із розливом радіоактивної важкої води, сталася на пакистанській АЕС Карачі (енергоблок № 1) у серпні 2017. Внаслідок локалізації розливу було переопромінено 4 особи. Ефективна дози опромінення одного з ліквідаторів досягла значення майже 40 мЗв, що у 2 рази перевищує встановлений нормами Пакистану ліміт дози для персоналу. За результатами розслідування ця подія була класифікована 2 рівнем за шкалою INES. Події такого типу також мали місце і в Україні: виток теплоносія за (22 вересня 2009 року під час проведення планового

випробування ІЗП КТ після зупину енергоблока №3 Рівненської АЕС на процедурі ППР-2009).

Постановка задачі

Перелік завдань на шляху комплексного дослідження наслідків подій із розливом РРС включає в себе:

- на прикладі зарубіжного та вітчизняного досвіду, актуальних результатів імовірнісного аналізу безпеки для АЕС України виділити можливі сценарії перебігу аварійних процесів;
- визначити загальні умови та характеристики атмосферного викиду, особливості стратегій ліквідації наслідків, та зменшення шкідливого впливу при подібних аваріях;
- з метою оцінки рівнів радіоактивного забруднення на об'єкті та кількісних характеристик викиду в оточуюче середовище розробити цілісну математичну модель транспорту радіоактивних речовин у аварійних приміщеннях;
- інтегрувати розроблену модель до існуючого програмного інструментарію щодо оцінки доз опромінення персоналу та населення, забруднення навколишнього середовища;
- на прикладі ряду демонстраційних розрахунків за репрезентативними аварійними сценаріями та на реальній ситуації провести верифікацію та валідацію розробки.

Як один з етапів вирішення проблеми оцінки наслідків подій із розливом РРС пропонується математична модель, що описує транспорт радіонуклідів в рамках аварійного приміщення та формування атмосферного викиду. Дана модель розроблена на основі

- результатів аналізу світового та вітчизняного досвіду подібних подій та з урахуванням особливостей їх протікання [2],
- результатів аналізу попередніх досліджень та існуючих засобів моделювання [3]

Постановка задачі базується на вимогах щодо інтеграції з боку суміжних комп'ютерних та математичних засобів оцінки радіологічного впливу, які розглянуті в роботі [4].

Фізична модель випаровування

Модель випаровування РРС визначає транспорт радіонуклідів в межах аварійного приміщення та визначає динаміку атмосферного викиду. Вона описує наступні фізичні явища:

- збільшення маси рідини у розливі у початковий момент витoku радіоактивної рідини з ємності зберігання;
- стратифікація за двома термодинамічними шарами;
- зменшення внутрішньої енергії рідини розливу за рахунок випаровування, конвекції, тепловіддачі конструкційним елементам;

- зміна концентрацій радіонуклідів у всіх фазах за рахунок радіоактивного розпаду;
- зміна концентрацій радіоактивних речовин у повітряній фазі відбувається за рахунок випаровування з вільної поверхні розливу, роботи системи вентиляції, осадження на будівельні конструкції та елементи обладнання, радіоактивного розпаду;
- зменшення маси рідкої фази за рахунок масовіддачі випаровуванням та дренажу РРС (примусового або неконтрольованих протічок РРС за межі технологічного приміщення);
- атмосферний викид паро-аерозольної радіоактивної суміші (ПАРС) за рахунок роботи припливно витяжної вентиляції за межі технологічного приміщення (неконтрольовані потоки ПАРС крізь нещільності будівельних конструкцій);
- часткове очищення ПАРС від радіоактивних аерозолів та сполук йоду на фільтруючих матеріалах вентсистеми.

Головні припущення при моделюванні процесу випаровування:

- температура РРС перевищує температуру повітря припливної вентиляції у початковий момент (гранична умова);
- тиск у повітряному просторі приміщення є постійним і рівний атмосферному;
- коефіцієнт теплопередачі від рідини до будівельних конструкцій не залежить від термодинамічних параметрів РРС;
- відсутній градієнт концентрації радіонуклідів у рідкій фазі розливу;
- сталість полів швидкостей аеродинамічних потоків та термодинамічних параметрів на всій поверхні випаровування.

Процес випаровування, що відбувається при безпосередньому контакті припливного повітря з поверхнею рідини, є комплексним. Він поєднує явища переносу тепла та вологи. Величина потоку маси ПАРС, яка виділяється з поверхні рідини визначається формулою Дальтона [5 – 7]

$$dm_w = -\beta_{sw} \cdot (p_{sw} - p_m) \cdot S dt \quad (1)$$

де m_w – маса пролітої радіоактивної рідини, кг;

β_{sw} – коефіцієнт масовіддачі (нормований для атмосферного тиску),

$$\frac{\text{кг}}{\text{Па} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}};$$

p_{sw} , p_m – тиски насичення РРС при температурі приповерхневого шару випаровування T_{sw} та температурі припливного повітря T_m відповідно (рис. 1), Па;

S – площа поверхні випаровування, м^2 ;

t – час, с.

Відповідно, тепло, що відводиться від рідини за рахунок випаровування

можна виразити як

$$dQ_{ev} = -r_w \cdot \beta_{sw} \cdot (p_{sw} - p_m) \cdot Sdt \quad (2)$$

де r_w – питома теплота пароутворення, Дж/кг

В даному випадку температура РРС проливу перевищує температуру припливного повітря вентиляції, тобто у пограничному шарі рідини з'являється температурний градієнт, характер якого залежить від інтенсивності тепломасообміну. Тому, у співвідношеннях (1) та (2) параметри β_{sw} і p_{sw} є функціями температури поверхні рідини T_{sw} , а величина r_w – функціями температури у товщі рідини T_w .

Результати експериментальних даних [7] показали, що інтенсивність вологовіддачі при випаровуванні з вільної поверхні залежить від гігротермічного стану потоку припливного повітря (рис. 1).

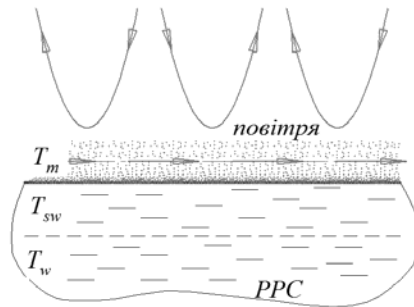


Рис. 1. Температурні шари

На базі експериментальних досліджень [5 – 15] була встановлена залежність температури поверхні рідини від гігromетричних та гідродинамічних умов процесу при направленому потоку тепла від поверхні рідини до оточуючого середовища.

На інтенсивність вивозу вологи з поверхні дзеркала випаровування рідини також чималий вплив має швидкість потоку припливного повітря над поверхнею рідини (рис. 1). Для практичних розрахунків в якості величини цього параметру задаються емпіричним значенням швидкості або використовують результати чисельного розрахунку вентиляції повітря для конкретного приміщення.

Модель випаровування також враховує тепловідвід від рідини тепловіддачею до поверхонь будівельних конструкцій. Тепловідвід від рідини до будівельних конструкцій описується наступним виразом:

$$dQ_f = k \cdot F \cdot (T_w - T_f) dt \quad (3)$$

де k – коефіцієнт тепловіддачі від рідини до підлоги приміщення, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$;
 F – площа контакту рідини з підлогою приміщення, $м^2$.
 T_f – температура підлоги приміщення, $^{\circ}C$
Тоді тепловий баланс для РРС можна записати як

$$c_p m_w dT_w = -r_w \beta_{sw} (p_{sw} - p_m) S dt - k F (T_w - T_f) dt \quad (4)$$

де c_p – ізобарна теплоємність РРС, $\frac{Дж}{кг \cdot К}$

Параметри $\beta_{sw}(T_{sw})$, $p_{sw}(T_{sw})$, $p_m(T_m)$, $r_w(T_w)$ та $c_p(T_w)$ представляють собою поліноміальні функції, що знаходяться шляхом апроксимації за табличними даними термодинамічних властивостей рідини та повітря.

Робота промислової вентиляційної установки визначається значення об'ємної витрати G_v . Також, ця величина враховує течі ПАРС через нещільності приміщення.

Після витяжного патрубку вентиляції, ПАСР частково осаджується на фільтрах. Це явище кількісно враховує коефіцієнт ефективності фільтруючої установки ψ . Ця величина визначає відносну величину ПАРС, що осідає на фільтруючому матеріалі установки. Далі, через вентиляційну трубу ПАРС попадає в атмосферу.

Як один із методів ліквідації аварії із розливом РРС розглядається подальша локалізація радіоактивної рідини за рахунок дренавання її насосами або самопливом. Даний процес враховується величиною витрати рідини проливу через дренажний канал G_v . Також, цей параметр включає течі ПАРС крізь нещільності будівельних конструкцій приміщення.

Необхідно зазначити, що часткове винесення радіоактивних речовин із рідини проливу при випаровуванні залежить від фізико-хімічних властивостей радіоактивних домішок та розчинника. Коефіцієнт H характеризує долю розчиненої речовини, що виноситься з парою розчинника при його випаровуванні. Останні дані щодо значень розподілу радіонуклідів між рідкою та паровою фазами представлено в [8, 9].

Система балансових рівнянь

Для розв'язання задачі нестационарного випаровування РРС була складена система чотирьох балансових диференціальних рівнянь (5), що пов'язує масові та енергетичні параметри РРС проливу та повітря аварійного приміщення в часі.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dm_w}{dt} = -\beta_{sw}(p_{sw} - p_m)S - G_d \\ \frac{dm_a}{dt} = \beta_{sw}(p_{sw} - p_m)S - G_V \cdot \frac{m_a}{V} \\ \frac{dm_q}{dt} = G_V \frac{m_a}{V} (1 - \psi) \\ \frac{dT_w}{dt} = -\frac{r_w \beta_{sw}(p_{sw} - p_m)S + kF(T_w - T_f)}{c_p m_w} \end{array} \right. \quad (5)$$

де m_w – маса пролітої радіоактивної рідини, кг;

$\beta_{sw}(T_{sw}, w)$ – коефіцієнт масовіддачі (нормований для атмосферного тиску) при швидкості набігаючого потоку повітря w , $\text{кг} \cdot \text{Па}^{-1} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$;

$p_{sw}(T_{sw}), p_m(T_m)$ – тиски насичення РРС при температурі приповерхневого шару випаровування T_{sw} та температурі припливного повітря T_m відповідно, Па;

$T_{sw}(T_w, w)$ – температура приповерхневого шару рідини, К;

S – площа відкритої поверхні випаровування рідини, м^2 ;

F – площа контактної поверхні «рідина – облицювання з температурою T_f », м^2 ;

m_a – маса пароаерозольної складової у повітрі приміщення (за умови ненасичення), кг;

G_d – масова витрата дренажу пролітої рідини, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$;

V – повітряний об'єм приміщення, м^3 ;

G_V – об'ємна витрата вентиляційної системи $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$;

k – коефіцієнт тепловіддачі (рідина – облицювання з температурою T_f), $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$

$r_w(T_w)$ – питома теплота пароутворення, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$

$c_p(T_w)$ – питома ізобарна теплоємність рідкої фази, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$

ψ – коефіцієнт фільтрації на фільтрах;

m_q – маса аерозолів, що надійшла до атмосфери, кг

t – час, с.

Дана система нелінійних диференціальних рівнянь включає в себе функції поліноміального виду. Оперуючи середовищем MathCad при розв'язанні системи (5) чисельним методом Рунге-Кута, можливо отримати

необхідні функції в матричному вигляді (значення шуканих параметрів в конкретні моменти часу).

Кінцевою задачею моделі випаровування РРС є визначення динаміки значень активності ПАРС у повітрі аварійного приміщення та інтегрального викиду радіоактивних речовин в атмосферу для конкретного радіонукліду.

Динаміка активності ПАРС у повітрі аварійного приміщення знаходиться за виразом (6).

$$A_{air}(t) = \frac{A_w}{V} H \cdot m_a(t) \quad (6)$$

де $A_w(t)$ – масова концентрація радіонукліду у РРС, Бк/кг;

На практиці для як параметр викиду використовують питому величину – масову долю виходу радіонукліда відносно його початкового вмісту в радіоактивній речовини:

$$q = \frac{A_w}{m_0} H \cdot m_q \cdot 100\% \quad (7)$$

m_0 – початкова маса пролітої радіоактивної рідини, кг

Дана величина виступає в якості вхідного параметру для оцінки приземних концентрацій радіоактивних речовин.

Демонстраційні оцінки

Результати демонстраційної оцінки динаміки активності повітря у технологічному приміщенні та інтегрального атмосферного викиду для сховища радіоактивних відходів представлено на рис. 2 – 4.

Використання суміжних засобів оцінки

Використовуючи програмні продукти ANSYS [16], OpenFOAM [18], SolidWorks [19], в рамках комплексної оцінки додатково вивчається вплив витрати вентиляційної системи на швидкість підстилаючого шару припливного повітря. Знайдені при цьому значення швидкостей, використовуються для уточнення температури приповерхневого шару рідини за рекомендаціями [5 – 7].

За результатами аналізу впливу було виявлено, що швидкість набігаючого потоку має суттєвий вплив на інтенсивність випаровування, як наслідок – викиду. Тому, одною з необхідних умов підготовки початкових даних та граничних умов для моделі є попереднє вирішення вентиляційної задачі в рамках технологічного приміщення.

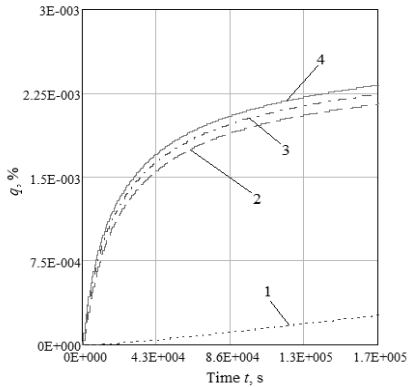
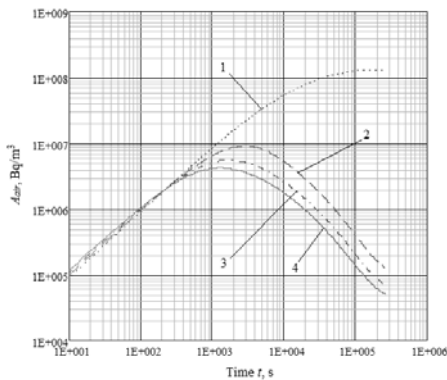


Рис. 2. Активність ^{137}Cs у повітрі аварійного приміщення (а) і масова частка його викиду в атмосферу (б) для наступних значень витрати вентиляційної системи: $G_V = 0$ $\text{м}^3/\text{с}$ (1); $G_V = 0.75$ $\text{м}^3/\text{с}$ (2); $G_V = 1.5$ $\text{м}^3/\text{с}$ (3); $G_V = 2.25$ $\text{м}^3/\text{с}$ (4)

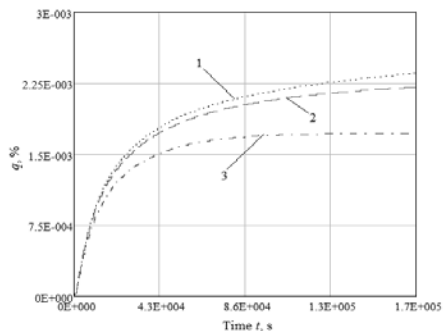
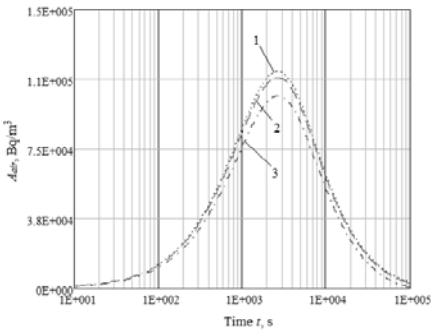


Рис. 3. Активність ^{137}Cs у повітрі аварійного приміщення (а) і масова частка його викиду в атмосферу (б) для наступних значень температур припливного повітря: $T_m = 5^\circ\text{C}$ (1), $T_m = 25^\circ\text{C}$ (2), $T_m = 45^\circ\text{C}$ (3)

На базі результатів математичної моделі з метою подальшого визначення радіологічного впливу на персонал населення та навколишнє середовище можуть бути використані аналітичні методи та програмні засоби (табл. 1)

Верифікація та валідація моделі

Для підтвердження ефективності і точності моделювання було проведено часткову валідацію та верифікацію моделі на реальній події, що сталася на пакистанській АЕС Карачі у 2017: переопромінення 4 представників персоналу в наслідок ліквідації аварії. Реконструкція доз

опромінення проводилась за допомогою розробленої моделі та порівнювалась із фактичним значення дози, накопиченої ліквідаторами за час робіт (табл. 2, рис. 5).

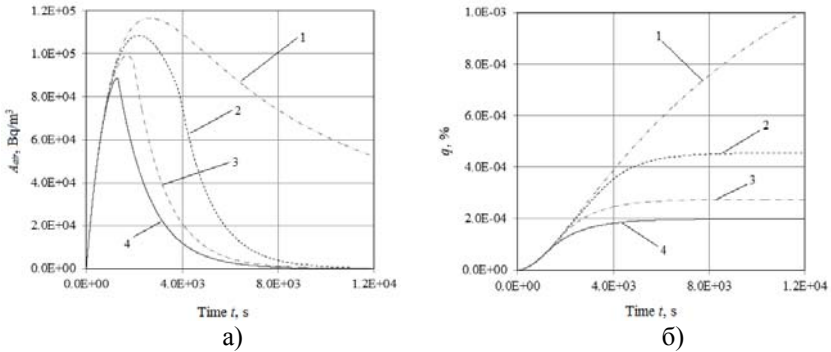


Рис. 4. Активність ^{137}Cs у повітрі аварійного приміщення (а) і масова частка його викиду в атмосферу (б) для наступних значень витрати дренажної системи: $G_d = 0$ $\text{кг}/\text{с}$ (1), $G_d = 50$ $\text{кг}/\text{с}$ (2), $G_d = 100$ $\text{кг}/\text{с}$ (3), $G_d = 150$ $\text{кг}/\text{с}$ (4)

Таблиця 1

Суміжні аналітичні методики та програмні засоби

Результат моделі	Опромінення персоналу	
	внутрішнє	зовнішнє
Масив миттєвих об'ємних концентрацій у приміщенні $A_v(t)$	<ul style="list-style-type: none"> – аналітична база та моделі (NRC, ICRP, UNSCEAR); – дозові коефіцієнти для інтегральних концентрацій FGR-11/13, EPA 	<ul style="list-style-type: none"> – аналітична база (NRC, EPA, ICRP) + дози контактного опромінення (α та β); – MICROSHIELD, ISOCSSR (+ дози від обладнання та домену проливу)
	Опромінення населення та забруднення навколишнього середовища	
Масив параметрів викиду в навколишнє середовище $Q(t)$	<ol style="list-style-type: none"> 1) RODOS: модель RIMPUFF з 10-хвилинним кроком дискретизації + модель доз FDMT [4, 20]; 2) ARGOS (CT ADM) та аналогічного рівня СППР [25]; 3) прецензійні атмосферні моделі ближньої зони (CFD, LES-модельовання); 4) спрощені гаусові підходи вимог НП.306.173-2011; 5) програмний засіб NRC MACCS (аналіз імовірнісних ефектів) [23, 24]; 6) INTERRAS (RASCAL), HOTSPOT (залповий викид) [22]; 7) PAVAN, ARCON 96, XOQDOQ (засоби оцінки RAMP) ; 	

Дані моделювання та вимірів

Представник персоналу	Ефективна доза опромінення за час ліквідації (оцінена за моделлю)	Фактична індивідуальна ефективна доза D_{eff} , мЗв	Коефіцієнт запасу k_{max} (песимістична оцінка)
№1	6.9...43.0	20.8(+/-30%)	2.07
№2	9.3...57.6	24.2(+/-30%)	2.38
№3	11.4...71.0	30.9(+/-30%)	2.30
№4	12.6...78.7	36.2(+/-30%)	2.17

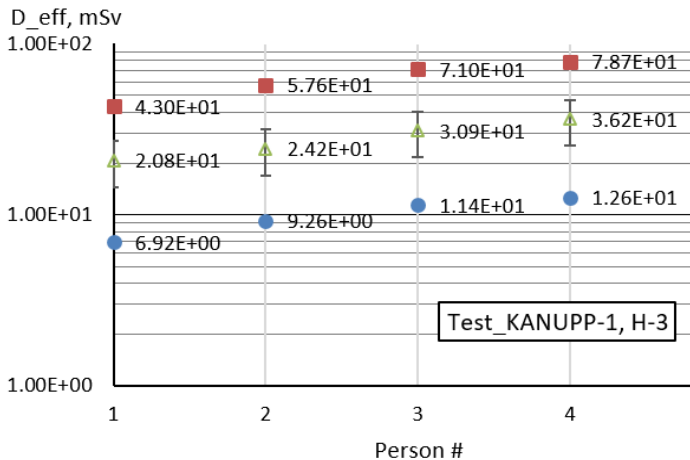


Рис. 5. Дані моделювання та вимірів

За результатами верифікації та валідації виділено наступне:

- фактичні дані увійшли до розрахункових меж ефективної дози, що є прийнятним;
- песимістична оцінка перевищила фактичні дані вимірів ~ в 2,0-2,3 рази, що є прийнятним
- розробка може використовуватись в якості інструменту реконструкції доз опромінення.

Висновки

З метою розроблення математичної моделі випаровування з відкритої поверхні радіоактивної рідини було досліджено фізичні явища, що мають суттєвий вплив на інтенсивність даного процесу. Було виділено основні припущення щодо моделювання даної групи подій.

Для врахування особливостей моделювання подій із розливом РРС пропонується математична модель, що дозволяє отримати динамічну картину об'ємних концентрацій радіонукліда в повітрі технологічного приміщення та потужності викиду в навколишнє середовище.

Дана розробка адаптована для її інтеграції з програмними засобами оцінки радіологічного впливу, продемонструвала прийнятний рівень консерватизму в рамках її валідації та верифікації на реальній події та готова до впровадження в дослідницьку діяльність.

1. Норми радіаційної безпеки України, доповнення: Радіаційний захист від джерел потенційного опромінення (НРБУ-97/Д-2000). Затверджено МОЗ Наказом №116 від 12 липня 2000 р.
2. *Каменева І.П., Кириленко Ю.О.* Проблема оцінювання радіаційного впливу при аваріях із розливом рідких радіоактивних середовищ / Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ ім Г.Є. Пухова НАН України. – Вип. 82. – К.: 2018. – С.52-64
3. *Каменева І.П., Кириленко Ю.О.* Комп'ютерні засоби моделювання наслідків радіаційних аварій та порушень нормальної експлуатації АЕС / Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ ім Г.Є. Пухова НАН України. – Вип. 84. – К.: 2018. – С.79-87.
4. *Каменева І.П., Кириленко Ю.О.* Підготовка вихідних даних для задач моделювання радіаційного впливу при аваріях із розливом рідких радіоактивних середовищ / Международная научная конференция «МОДЕЛИРОВАНИЕ-2018». Сборник трудов конференции. К., 2018. – С.162-165.
5. *Волков О.Д.* Вентиляция промышленного здания: [Учебн. пособие] – Х.: Вища шк. Изд-во при ХГУ, 1989 – 240 с.
6. *Нестеренко А.В.* Основы термодинамических расчётов вентиляции и кондиционирования воздуха: [Учебн. пособие]; изд. 3 доп. – М.: Высшая школа, 1971 – 460 с.
7. *Молчанов Б.С.* Проектирование промышленной вентиляции. – Л.: Стройиздат. Ленинградское отделение, 1970. – 228 с.
8. NUREG-0016 «Calculation of Releases of Radioactive Materials in Gaseous and Liquid Effluents from Boiling Water Reactors», 1979
9. NUREG-0017 «Calculation of Releases of Radioactive Materials in Gaseous and Liquid Effluents from Pressurized Water Reactors», 1985
10. ANSI/ANS-18.1-1999, “Radioactive Source Term for Normal Operation of Light Water Reactors”
11. ANSI/ANS-18.1-2016 American National Standard «Radioactive Source Term for Normal Operation of Light Water Reactors»
12. *Poos T, Varju E.* Determination of evaporation rate at free water surface, 8th International Symposium on Exploitation of Renewable Energy Sources, p.66-71 2016
13. *Zilberman B.Ya., Ryabkov D.V., Puzikov E.A., Andreeva E.V. and Mishina N.E.* Influence of Pressure (Temperature) on the Nitric Acid Distribution between the Liquid and Vapor in the Course of Evaporation of Nitric Acid Radioactive Waste / Radiochemistry, 2016, Vol. 58, No. 3, pp.237-242, 2016
14. *M. Orvos, V. Szabo, and T. Poos* Rate of Evaporation from the Free Surface of a Heated Liquid, Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, Vol. 57, No. 6, pp.1108-1117, 2016

15. *Lukashov V., Romanko S, Timofeev S, Protsenko A.* Rate of Components Evaporation from Sulfuric Acid Solution During Its Concentrating in Air Flow / Chemistry & Chemical Technology, Vol. 11, No. 3, pp.344-348, 2017
16. ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide. ANSYS, Inc. is certified to ISO 9001:2008, 2009 – 2070 pp.
17. *Azarenkov N.A., Rudychev V.G., Pismenetskiy S.A.* Solid and liquid waste processing and reducing of personnel doses / «Journal of Kharkiv National University» physical series «Nuclei, Particles, Fields», issue 3 /55/, 1017, 2012– pp.117-122
18. *Greenshields C.* OpenFOAM User Guide version 6. The OpenFOAM Foundation, 2018 – 237 pp.
19. Сайт SolidWorks Flow Simulation <https://hawkridgesys.com/solidworks/> (відкритий доступ станом на 02.10.2018)
20. *Raskob W., Landman C. Trybushnyi D.* Functions of decision support systems (JRodos as an example): overview and new features and products (el source <https://www.radioprotection.org/articles/radiopro/pdf/2016/03/radiopro160015-s.pdf>)
21. HotSpot Health Physics Codes Version 3.0 User's Guide/ National Atmospheric Release Advisory Center, LNL, 2014 – 198 pp.
22. RASCAL 4.3 User's Guide / Ramsdell Environmental Consulting, LLC, 2013– 125 pp.
23. Сайт Sandia <https://www.sandia.gov/> (відкритий доступ станом на 02.10.2018)
24. WinMACCS, a MACCS2 Interface for Calculating Health and Economic Consequences from Accidental Release of Radioactive Materials into the Atmosphere MACCS User's Guide / U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2007 – 233 pp.
25. Богорад В. І., Белов Я. Ю., Кириленко Ю. О. та ін. Поєднання апаратних засобів мобільної лабораторії RapidSONNI та комп'ютерних технологій СПІР RODOS для прогнозу наслідків виникнення пожежі в зоні відчуження Чорнобильської АЕС / Журнал «Ядерна та радіаційна безпека», №3(79).2018, – С.10-15

<http://doi.org/10.5281/zenodo.3612242>

Поступила 16.09.2019р.

УДК 681.3

А.В. Ільєнко, Київ

С.С. Ільєнко, Київ

О.В. Прокопенко, Київ

ОЦІНКА ПРОДУКТИВНОСТІ АЛГОРИТМІВ ГОМОМОРФНОГО ШИФРУВАННЯ ВІДПОВІДНО ДО ДСТУ ISO/IEC 14756:2010

Abstract. We proposed the method for evaluating the performance of applications and implementations of homomorphic encryption algorithms to ensure the integrity and confidentiality of information in modern systems and networks based on the DSTU ISO 14756: 2010 standard. The procedure for evaluating performance is determined in stages. The series of experiments is conducted.