

междисциплинарных исследованиях / М.З. Згуровский, А.А. Болдак, К.В. Ефремов // Кибернетика и системный анализ. – 2013. – Т. 49, № 4. – С.62-75.

8. Моніторинг довкілля : підручник / [Боголюбов В.М., Клименко М.О., Мокін В.Б. та ін.] ; під ред. В.М. Боголюбова. [2–е вид., перероб. і доп.]. – Вінниця : ВНТУ. – 2010. – 232 с.

9. Постанова КМУ «Про затвердження Порядку організації та проведення моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря» від 9 березня 1999 р. N 343. – Київ.

*Поступила 5.02.2018р.*

УДК 621.039.586

Ю.О. Кириленко, Київ

І.П. Каменева, Київ

## **ПРОБЛЕМА ОЦІНЮВАННЯ РАДІАЦІЙНОГО ВПЛИВУ ПРИ АВАРІЯХ ІЗ РОЗЛИВОМ РІДКИХ РАДІОАКТИВНИХ СЕРЕДОВИЩ**

**Abstract.** This paper is focused concerning issue of radiation impact evaluation in case of spills of liquid radioactive material. Potential sources of spills, analysis of worldwide accidents and incidents with spills of liquid radioactive material are represented.

### **Вступ**

З метою підвищення безпеки підприємств атомної галузі необхідно вдосконалити методологічну та інструментальну базу щодо аналізу та оцінки безпеки енергоблоків АЕС, які на даний момент знаходяться в експлуатації, а також енергоблоків, будівництво яких планується. Розробка нових комп'ютерних засобів та математичних моделей оцінки радіаційних наслідків викидів спрямована на вирішення ряду задач у даному напрямку. В першу чергу це такі задачі 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 [1];

– аналіз порушень нормальної експлуатації, проектних та пізніх фаз запроектованих аварій АЕС в рамках проектних обґрунтувань експлуатуючої організації та оцінок впливу на оточуюче середовище [2];

– експертна оцінка даних звітів з аналізу безпеки;

– розробка імовірнісного аналізу безпеки 3-го рівня [3];

– аварійне реагування на радіаційні аварії у реальному часі.

Згідно з Енергетичною стратегією України на період до 2030 року [4] та

Програми КзППБ [5] держава планує підвищити рівень безпеки підприємств атомної галузі. На сьогодні існує чимало робіт, які дозволяють оцінити кількісні характеристики аварійного викиду із таких підприємств та його радіаційні наслідки. З кінця 90-их років основні консервативні підходи щодо визначення параметрів джерела викиду та радіаційних наслідків вже знайшли своє місце у проектних обґрунтуваннях експлуатуючої організації та у експертній діяльності регулюючого органу країни для великого спектру аварійних умов.

Однак, у світлі проведення імовірнісного аналізу безпеки для енергоблоків українських АЕС та введення вимог НРБУ-97/Д-2000 [6] щодо потенційного опромінення населення, у кінці 2000-их з'явилася потреба у більш реалістичному та прецизійному моделюванні таких подій на АЕС як порушення нормальної експлуатації (події, частота реалізації яких може перевищити значенням  $10^{-2}$  1/рік). Після проведення імовірнісного аналізу безпеки до таких подій віднесено аварії із розливом рідких радіоактивних середовищ (PPC).

В рамках аналізу проблеми оцінювання радіаційного впливу при аваріях із розливом PPC необхідно виділити наступні етапи:

- визначити загальні характеристики та основні джерела викиду при подібних аваріях;
- проаналізувати зарубіжний та вітчизняний досвід щодо аварій та інцидентів за участю PPC;
- сформулювати пропозиції щодо вирішення проблеми.

#### **Рідкі радіоактивні середовища як потенційні джерела викиду**

Під PPC розуміють рідкі розчини, до складу яких входять домішки радіоактивних ізотопів (можливо пов'язаних у високомолекулярні комплекси). Ізотопний склад PPC визначається, насамперед, джерелом напрацювання радіоактивних домішок.

PPC на АЕС можуть бути представлені в різному вигляді:

- рідини технологічних контурів;
- рідкі радіоактивні відходи;
- дренажні та дезактиваційні стоки;
- вода, що застосовується для промивки іонообмінних фільтрів;
- стоки спецпралень і душових;
- забруднені води хімлабораторії [7].

У той же час, PPC можуть розташовуватись: як у гермооб'ємах енергоблоків АЕС, так і за його межами (наприклад, у спецкорпусі). На енергоблоках України температури PPC можуть досягати 320 °C (під тиском), у трубопроводах та баках спецкорпусів можливі коливання в межах від 40 до 100 °C, залежно від шляхів зливу радіоактивних стоків [8]. Для аварій із розливом таких середовищ характерна інтенсивна тепловіддача за рахунок випаровування рідини – утворення паро-аерозольних форм, які в подальшому локалізуються на матеріалах очисних або локалізуючих систем – наприклад, на краплинах спринклерної системи або на газо-аерозольних фільтрах

вентиляційних установок. У випадках непрацездатності локалізуючих систем безпеки, реалізуються значні викиди радіонуклідів через нещільності аварійних приміщень.

Ізотопний склад і активність РРС на АЕС сильно варіюється. Наприклад, теплоносії першого контуру та вода басейну витримки АЕС з легководними реакторами являють собою сукупність уламків вимушеного поділу  $^{235}\text{U}$  та  $^{238}\text{U}$ , ізотопів корозійних металів реакторної установки (РУ). У межах спецкорпусу радіоактивні середовища можуть витримуватися довгий час і включати в ізотопний склад лише довгоіснуючі радіонукліди ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  та ін.). Аналогічна ситуація спостерігається і на дослідницьких реакторах [9]. Важка вода, що використовується в якості сповільнювача на важководних реакторах, також, має високу активність за рахунок наявності в ній тритію [9].

Світові ядерні комплекси напрацьовують та переробляють радіоактивні матеріали (наприклад, паливо для АЕС, ізотопні суміші, ДІВ промислового та медичного призначення). На ядерних комплексах, як і на АЕС, використовують реакторні установки різної потужності, залежно від масштабів виробництва радіоактивних матеріалів.

Ядерні комплекси, хімкомбінати та дослідницькі центри також працюють із РРС. Відмінною особливістю цих підприємств у порівнянні з АЕС, з точки зору характеристик використовуваних РРС, є великий спектр радіоактивних розчинів, що беруть участь у технологічних процесах підприємства [11].

### **Аварії та інциденти з розливом радіоактивної рідини**

Згідно з Міжнародною шкалою ядерних та радіологічних подій INES [12], аваріям, що включають розливи РРС, в залежності від величини викиду і відповідних радіаційних наслідків, теоретично можуть бути присвоєні різні рівні небезпеки (від рівня «0 *«Подія з відхиленням нижче шкали»* до «7 *«Велика аварія»*). Такий підхід відображує конструкційні особливості відведення тепла від активної зони реакторів, що працюють на рідкому теплоносії. При важкій аварії із розплавленням активної зони реактора продукти ділення ядерного палива входять у безпосередній контакт з рідким теплоносієм та водою систем аварійного охолодження, який призведе до подальшого утворення РРС. Слід також зазначити, значний внесок в активність викиду реалізує нейтронна активація теплоносія протягом кампанії на реакторних установках. Як у першому, так і в другому випадку активність рідких середовищ являє собою малу частину загальної активності викиду. Тому, при оцінках наслідків важких аварій активністю викиду за рахунок випаровування з рідких розливів часто нехтують. Але, якщо аварія передбачає викид виключно за рахунок випаровування РРС з відкритих поверхонь, залежно від концентрації радіонуклідів в рідині та умов аварії, викид може становити значну загрозу для персоналу, населення і навколишнього середовища.

За матеріалами огляду аварій із розливом РРС за останні 65 років у табл. 1 була систематизована основна інформація щодо аварій на зарубіжних підприємствах атомної галузі.

Таблиця 1

Аварії та інциденти із розливом РРС на зарубіжних підприємствах атомної галузі

№ з/п	Дата	Місце	Рівень за шкалою INES	Опис події
1	Грудень 1952	Канада, дослідницький реактор «NRX»	5	Часткове розплавлення активної зони, витік 4 тисяч кубометрів радіоактивної води загальною активністю близько 10 000 Ки [13]
2	Червень 1973	США, Атомний комплекс «Ханфорд»	3	Витік 115 тис. галонів (більш ніж 430 кубометрів) радіоактивної рідини із контейнера з радіоактивними відходами [14]
3	Травень 1984	СРСР, Калінінська АЕС	N/A	Падіння тиску у реакторі, витік 200 м <sup>3</sup> радіоактивної води. [15, 16]
4	Серпень 1984	СРСР, ядерний комплекс «Маяк».	N/A	Витік радіоактивної води з першого контуру першого енергоблоку, опромінення 13 працівників об'єкта [16, 17]
5	Грудень 1987	Німеччина, АЕС «Бібліс-А»	1	У результаті помилки персоналу відбувся витік теплоносія першого контуру системи охолодження [15, 17]
6	Лютий 1991	Японія, АЕС «Міхаме»	2	У результаті пошкодження трубопроводу відбувся вихід радіоактивної води та радіоактивної пари за межі системи охолодження реактора 2-го енергоблока АЕС [15, 17]
7	Березень 1991	Індія, АЕС КАЛРАККАМ-1	1	Збільшення концентрації <sup>3</sup> H у повітрі технологічного приміщення внаслідок розливу важкої води[17]

Таблиця 1 (продовження)

№ з/п	Дата	Місце	Рівень за шкалою INES	Опис події
8	Травень 1991	Словаччина, АЕС Богуннице (1-й енергоблок)	3	У результаті помилки персоналу відбувся розлив 100 л високоактивного розчину із баку зберігання на підлогу реакторного відділення. Сумарна активність викиду склала $\sim 10^{11}$ Бк [17]
9	Серпень 1992	Чехія, АЕС Дуковани (1-й енергоблок)	1	В результаті помилки персоналу відбувся розлив радіоактивної борованої води у об'ємі 1,6 м <sup>3</sup> з питомою активністю 7,83Е-3 Бк/л [17].
10	Вересень 1992	Росія Кольська АЕС (3-й енергоблок),	0	Розлив 400 м <sup>3</sup> води з питомою активністю 2Е-5 Ки/л, що призвів до збільшення потужності дози у аварійному приміщенні до 3 мкР/с та щільності забруднення відкритих поверхонь 2Е+3 β-часток/(см <sup>2</sup> *хв) [17]
11	Грудень 1992	Росія, Білгородська АЕС	2	Витік 15 кубометрів рідких радіоактивних відходів загальною активністю 6 Ки [15, 17]
12	Серпень 1993	США, АЕС «Браунс Феррі»	N/A	Руйнування трубопроводу в результаті корозії та витік радіоактивного теплоносія [15, 17]
13	Травень 1994	Росія, Ядерний комплекс «Маяк»	N/A	Викид радіоактивних речовин через вентиляційну систему в результаті розливу радіоактивної рідини [17]
14	Травень 1995	Канада, АЕС в Брюсе	N/A	В результаті аварії було втрачено більше ніж 60 т важкої води. Протягом 3 днів в атмосферу виділявся тригій [17]
15	Січень 1996	Індія, Калпакам (енергоблок№1)	0	Розлив важкої води в межах технологічних приміщень реакторної установки. Успішне дренування води розливу [17]

Таблиця 1 (продовження)

№ з/п	Дата	Місце	Рівень за шкалою INES	Опис події
16	Травень 1996	Болгарія, АЕС Козлодуй, KOZLODUY-3	1	В результаті витіку радіоактивної води із технологічного трубопроводу спец корпусу №. 2 близько 8 м <sup>2</sup> стіни будівлі та близько 6 м <sup>2</sup> поверхні землі було забруднено. Витік відбувся під час операцій з очищення трубопроводу. Максимальна потужність дози в місті локалізації $\gamma$ -випромінювання становила 20 мР/год [17].
17	Червень 1999	Росія, ЯК «Маяк»	N/A	Протічка радіоактивної охолоджуючої води через корозійні тріщини у технологічному трубопроводі [16]
18	Квітень 2000	Індія, АЕС Нарора, NARORA-2	1	Опромінення 2 представників персоналу (інгальція парами <sup>3</sup> H) в результаті витіку 7 м <sup>3</sup> важкої води із системи сповільнювача. Дози опромінення не перевищили відповідних національних норм [17].
19	Листопад 2000	Росія, завод ФГУП РНЦ «Прикладна хімія»	2	Розлив 71 м <sup>3</sup> рідких радіоактивних відходів на території заводу [18]
20	Квітень 2004	Німеччина, АЕС «Філіпсбург-1»	-	Скид радіоактивної води під час проведення планової перевірки [15]
21	Грудень 2004	Чеська Республіка, АЕС «Темелін»	0	У результаті аварії на територію станції пролилося близько 20 м <sup>3</sup> радіоактивної води із питоמוю активністю 1Е6-1Е5 Бк/л. Радіоактивне забруднення поверхонь стін приміщення ~8 Бк/см <sup>2</sup> . Розлив був успішно локалізований з використання системи трапів [17, 19]

Таблиця 1 (продовження)

№ з/п	Дата	Місце	Рівень за шкалою INES	Опис події
22	Квітень 2005	Великобританія, АЕС «Селафілд»	3	Розлив високозбагаченого урано-плутонієвого розчину на підлогу технологічного приміщення [15-17]
23	Березень 2006	США, Ервін, завод з напрацювання ядерного палива	N/A	На заводі відбувся витік 35 л високозбагаченого розчину урану. У результаті аварії більше сотні осіб отримали дозу опромінення, яка в середньому у 5 разів перевищила річну норму відповідно до нормативів США [15]
24	Жовтень 2010	Литва, Ігналінська АЕС	N/A	Розлив ~300 традіоактивного дезактиваційного розчину, що містив 1% азотної кислоти та перманганату калію [20, 21]
25	Жовтень 2011	Пакістан, АЕС Карачі, KANUPP-1	1	Спрацювання сигналізації за перевищенням концентрації <sup>3</sup> H у повітрі технологічного приміщення внаслідок розливу 1200 кг важкої води [17, 22]
26	Серпень 2017	Пакістан, АЕС Карачі, KANUPP-1	2	Переопромінення 4 осіб із персоналу в результаті ліквідації розливу радіоактивної важкої води загальною масою 1589 кг у технологічному приміщенні. Ефективні дози опромінення за час локалізації розливу досягли 20,8 мЗв, 24,2 мЗв, 30,9 мЗв та 36,2 мЗв (ліміт дози для персоналу – 20 мЗв) [17]



Зазначимо, що у табл. 1 наведено максимально повний перелік подій згідно з інформацією відкритих світових джерел. Інциденти, інформація про які з тих чи інших причин була засекречена або прихована, у даному переліку відсутні. Також, необхідно відмітити низьку кількість офіційних звітів щодо радіаційних наслідків аварій та інцидентів. Так, за інформацією [20, 21] у 2010 році на Ігналінській АЕС мав місце розлив близько 300 т радіоактивного дезактиваційного розчину. Фотоматеріали цього інциденту наведено на рис. 1. Для цієї події офіційна інформація щодо результатів дозиметричної розвідки на проймайданчику АЕС, як і класифікація за шкалою INES, не надавалася.



Рис. 1. Фотоматеріали інциденту з розливом радіоактивного дезактиваційного розчину на Ігналінській АЕС, Литва, жовтень 2010: вид на трубопровід, що зазнав розриву (а), загальний вид на частину розливу (б) [20]

На прикладі аварії на російському дослідному заводі ФГУП РНЦ «Прикладна хімія», розглянемо характерні радіаційні наслідки для аварій виключно з розливом РРС.

У результаті розливу рідких радіоактивних відходів зі складним радіонуклідним складом в кількості  $71 \text{ м}^3$  з ємності-сховища на території дослідного заводу ФГУП РНЦ «Прикладна хімія» спостерігалось підвищення потужності експозиційної дози, що коливалася на різних ділянках від 105 мкР/год до 1000 мкР/год. Отримані ліквідаторами дози зовнішнього опромінення за період робіт склали 0,4 – 0,7 мЗв, а колективна накопичена доза – 0,00081 люд.-Зв. Дози за рахунок накопичення тритію у водній фазі організму склали не більше 100 мкЗв. Іншими словами, дози опромінення учасників робіт з ліквідації радіаційного події склали не більше 5% від дозових лімітів для персоналу, встановлених нормами Російської Федерації. Персонал було включено до групи диспансерного обліку. Лікарсько-інженерна бригада забезпечила мінімізацію доз опромінення ліквідаторів і готовність надання екстреної медичної допомоги [18]. В даному випадку оперативна оцінка і консервативний прогноз масштабів аварії дозволили забезпечити ефективність ліквідації радіоактивного забруднення території.



Більш важка радіаційна ситуація, пов'язана із розливом радіоактивної важкої води, склалася на пакістанській АЕС Карачі (енергоблок № 1) у серпні 2017 [17]. Внаслідок локалізації розливу було опромінено 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 на 2 рівнем за шкалою INES.

За час своєї незалежності Україна також мала досвід інцидентів із розливом РРС. Найбільш масштабні випадки наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Інциденти із розливом РРС в Україні

№ з/п	Дата	Місце	Рівень за шкалою INES	Опис події
1	Грудень 1995	Южно-українська АЕС	1	Виток радіоактивної рідини із технологічного трубопроводу. У результаті була забруднена територія площею 30 м <sup>2</sup> [17]
2	Лютий 2002	Хмельницька АЕС	1	У результаті помилки оперативного персоналу залишився відкритим клапан ємності басейну перезавантаження палива. У результаті вода басейну з активністю 2,84Е-6 Ки/л почала надходити до реакторного відділення. Об'єм розливу сягнув 3 м <sup>3</sup> [17]
3	Вересень 2009	Рівненська АЕС	0	Внаслідок неспадки імпульсно-запобіжного пристрою компенсатора тиску (ІЗП КТ), на підлогу приміщення ГО відбувся розлив теплоносія першого контуру РУ [23]
4	Серпень 2015	Хмельницька АЕС	0	Розлив теплоносія першого контуру в межах технологічних приміщень ГО [24]

На українських АЕС нерідко зустрічаються помилки персоналу та відмови обладнання, пов'язані із незакриттям запобіжних клапанів компенсатора тиску. Так, наприклад, 22 вересня 2009 року під час проведення планового випробування ІЗП КТ після зупину енергоблока №3 Рівненської АЕС на процедуру ППР-2009, несвоєчасно закритися головний запобіжний клапан. У встановленому порядку була створена комісія для розслідування причин даного порушення. У результаті відкриття клапану відбувся вихід теплоносія за межі першого контуру у приміщення гермозони в об'ємі

близько 230-250 м<sup>3</sup>. За межами гермозони значення параметрів радіаційно обстановки не перевищували верхні регламентні границі та допустимі рівні згідно даних автоматизованої системи радіаційного контролю [23].

У наведених даних не враховано події, що пов'язані із радіоактивними скидами у ґрунтові води, водойми, річки, моря, океани, тощо. Так, наприклад, проблема зберігання рідких радіоактивних відходів до останнього часу залишається актуальною на АЕС Фукусіма, де чисельні скиди радіоактивної води спостерігаються вже продовж 7 років.

Аварії та інциденти із розливом РРС не обмежуються рідкісними випадками радіоактивних забруднень технологічних приміщень і прилеглих до них територій з початку розвитку атомної галузі. Як видно із табл. 1, 2, більшість подій класифіковано відносно невисокими рівнями за шкалою INES (рівні від «0» до «3»). Переважними джерелами викидів є теплоносії перших контурів реакторних установок, рідкі радіоактивні відходи, дезактиваційні розчини, високоактивні розчини урану та плутонію, рідкий сповільнювач на важководних реакторах. Приблизно у половині випадків вчасна локалізація розливу за допомогою системтрапів дозволила суттєво знизити дози опромінення персоналу, ступінь забруднення технологічних приміщень та величину атмосферного викиду.

У ході більш детального аналізу радіаційних наслідків інцидентів та аварій із розливом РРС було визначено критичну групу опромінення – представників персоналу аварійних об'єктів, та критичні шляхи опромінення: зовнішнє від розливу та внутрішнє за рахунок інгаляційного надходження радіонуклідів. Окрім цього, для аварій із розливом важкої води є характерним  $\beta$ -опромінення поверхневого шару шкіри у зонахприлягання тканинного одягу. У переважній кількості подій спостерігається опромінення персоналу на етапі проведення заходів по відновленню обладнання, локалізації розливу та ліквідації радіаційних наслідків. Під час деяких подій зареєстровано переопромінення персоналу вище лімітів доз, встановлених нормами МАГАТЕ [25] та відповідними державними нормативними документами.

Хоча в більшості розглянутих аварій та інцидентів інформація щодо забруднення навколишнього середовища не надається, наразі вимоги сучасної нормативної бази багатьох країн (включно з Україною) потребують обґрунтування щодо неперевищення встановлених лімітів доз опромінення представників всіх референтних груп населення для порушень нормальної експлуатації, під класифікацію яких підпадають аварії із розливами РРС [26]. Критерії прийнятності щодо оцінки радіаційного впливу для цих аварій визначаються контрольними та допустимими рівнями викидів та скидів з об'єкта у навколишнє середовище, які в свою чергу повинні обмежувати радіаційний вплив до рівнів лімітів доз опромінення населення, що встановлюються нормативною базою тієї чи іншої країни [27].

На відміну від аварій з каскадним характером викиду, таких як, наприклад, важкі аварії на АЕС (викид внаслідок розуцільнення гермооболонки, або викид через швидкодіючі пароскидні пристрої), для

класу аварій із розливом РРС характерна тривала динаміка викиду. Це пов'язано, насамперед із низьким термодинамічним потенціалом системи «РРС-повітря приміщення», як наслідок, тривалим процесом масопереносу з поверхні випаровування недогрітої рідини. Після випаровування радіоактивні речовини потрапляють у повітряний простір над розливом. Так, у випадках розливу радіоактивної рідини в закритих (герметичних) приміщеннях з примусовою вентиляцією (гермооб'єм, сховища рідких радіоактивних відходів, спецкорпуси та ін.), утворюється паро-аерозольна суміш, яка, проходячи через агрегати примусової вентиляції і частково осідаючи на очисних фільтрах, через вентиляційну трубу потрапляє до навколишнього середовища. В більшості ситуацій проектними системами забезпечується моніторинг та контроль даних щодо активності викиду. Однак, у випадках розливів у негерметичних приміщеннях чи на відкритому повітрі контроль активності викиду відсутній.

### **Висновки**

В результаті огляду загальних властивостей РРС та аналізу більш ніж 30 аварій та інцидентів за їх участю, що мали місце на об'єктах різних країн світу, визначено основні критерії для оцінювання таких аварій:

- можливі джерела викиду, спектр хімічного та ізотопного складу РРС;
- температури РРС, що задіяні у тепло- та масообмінних процесах;
- критичний шлях та критична група опромінення;
- особливості роботи дренажних, фільтруючих та інших локалізуючих засобів;
- потенційні масштаби та ступені радіоактивного забруднення;
- характерні умови транспорту радіоактивних речовин у замкненому приміщенні та за його межами.

В цілому, однією з головних проблем прогнозування радіаційних наслідків при аваріях із розливом рідких радіоактивних середовищ є отримання повної динамічної картини щодо активності повітряної фази над розливом, оцінка величини викиду, радіаційного впливу на персонал, найбільш вразливі категорії населення та прилеглі території.

Для вирішення цієї проблеми необхідно визначити адекватні засоби математичного та комп'ютерного моделювання радіаційного впливу при подібних аваріях. Отже, подальші дослідження у цьому напрямку потребують якісного аналізу наявних галузевих та загальногалузевих комп'ютерних засобів з метою виділення корисного функціоналу та визначення обмежень існуючих засобів для моделювання наслідків аварій із розливом РРС.

1. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). Затверджено МОЗ Наказом №208 від 14 липня 1997р.
2. IAEA-TECDOC-1200 Applications of probabilistic safety assessment (PSA) for nuclear power plants, IAEA, Vienna, 2006 –104 pp.
3. IAEA-TECDOC-1511 Determining the quality of probabilistic safety assessment (PSA) for applications in nuclear power plants, IAEA, Vienna, 2006 – 178 pp.

4. Енергетична стратегія України до 2030 року. Схвалена розпорядженням КМУ від 24 липня 2013 р. № 1071-р.
5. Комплексна зведена програма підвищення безпеки енергоблоків атомних електростанцій України. Постанова Кабінету Міністрів України №1270 від 07.12.2011 р.
6. Норми радіаційної безпеки України, доповнення: Радіаційний захист від джерел потенційного опромінення (НРБУ-97/Д-2000). Затверджено МОЗ Наказом №116 від 12 липня 2000 р.
7. The radiochemistry of nuclear power plants with light water reactors/ Karl-Heinz Neeb, Handbook – Berlin: New York, 1997 – 725 pp.
8. Отчет по анализу безопасности. Анализ проектных аварий. Ровенская АЭС, 2017
9. Звіт з аналізу безпеки. Дослідницький реактор ВВР-М. Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, 2016
10. Safe Handling of Tritium Review of Data and Experience. Technical Reports Series No. 324, IAEA, 1991– 146 pp.
11. IAEA-TECDOC-1267 Procedures for conducting probabilistic safety assessment for non-reactor nuclear facilities, IAEA, Vienna, 2002 – 72 pp.
12. INES-2008 Международная шкала ядерных и радиологических событий. МАГАТЭ, Вена, 2010 – 250 с.
13. Lewis W.B. The accident to the NRX reactor on December 12, 1952. Technical Report No DR-32; AECL-232, 1953 – 14 pp.
14. Johnson M.E., Field J.G. Hanford SX-Farm Leak Assessments Report. Washington River Protection Solutions LLC, RPP-ENV-39658 Revision 0, 2010
15. IAEA-TECDOC-867 Significant incidents in nuclear fuel cycle facilities. IAEA, VIENNA, 1996 – 89 pp.
16. Офіційний сайт Greenpeace Росія, електронне джерело, відкритий доступ <http://www.greenpeace.org/russia/ru/>
17. National Nuclear Energy Archive LAKA. Source is available <https://www.laka.org/docu/ines/event/>
18. Матеріали по оценке воздействия на окружающую среду намечаемой деятельности по эксплуатации ядерной установки – комплекса с ядерными материалами, предназначенного для радиохимической переработки отработавшего ядерного топлива. ФГУП «ПО «Маяк», 2012
19. Pavel Pittermann message: Temelin Unit 2 leakage, State office for Nuclear Safety, source is available: <https://www.sujb.cz/en/reports/temelin-unit-2-leakage/>
20. Accidents and incidents. Article published on November 10, 2010 by Andrey Ozharovsky, source is available: <http://bellona.org/>
21. Information about the Causes of Unit 1 Main Circulation Circuit Sealing Failure Occurred during Its Decontamination. Source is available: <https://www.iae.lt/en/news/archive/2010/>
22. The Information Channel on Nuclear and Radiation events <https://www-news.iaea.org/>
23. Анализ инцидента 22 сентября 2009 г. с незакрытием импульсно- предохранительного устройства компенсатора давления на энергоблоке № 3 ОП "Ривненская АЭС"
24. Повідомлення ДП «НАЕК «Енергоатом» щодо відхилення в роботі ХАЕС від 28.08.2015. Відкритий доступ: <http://www.energoatom.kiev.ua/>
25. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. GSR Part 3 – Interim edition. – Vienna: International Atomic Energy Agency,

2014 – 471 pp.

26. Prospective Radiological Environmental Impact Assessment for Facilities and Activities. Safety guide DS427 – Vienna: International Atomic Energy Agency, Draft Version 8.5, November 2016 – 70 pp.

27. Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency. GSR Part 7–Vienna: International Atomic Energy Agency, 2015 – 136 pp.

*Поступила 12.02.2018р.*

УДК 504.054:05 614.7

Т.М. Яцишин, Івано-Франківськ

### **ВИБІР МАТЕМАТИЧНИХ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПОЛУМ'Я АВАРІЙНОГО ГАЗОВОГО ФАКЕЛУ**

**Abstract.** The main characteristics of gas flare burning have been investigated and the processes of diffusive burning during emergencies. The mathematic regularities for definition the heat-affected zone have been analyzed. The dependence of gas flare intensity change determined by its distance from wellhead has been given as an example which makes it possible to define the safe distance from the flare center where the staff can work for a long period of time.

#### **Актуальність**

На різних етапах діяльності нафтогазовидобувної галузі існує високий ризик виникнення некерованих аварійних ситуацій. Окремої уваги потребують аварії, пов'язані з появою фонтану на свердловинах [1]. Такі екстремальні ситуації можуть виникати як при розвідувальних роботах, спорудженні свердловини так і на свердловинах, виведених з експлуатації. Причинами цих аварій можуть бути: відмови механізмів, людський фактор, порушення технології видобутку, природні катастрофи тощо. При цьому, окрім значних матеріальних затрат, присутні колосальні екологічні збитки, які точно оцінити практично не вдається.

В праці В.А. Кузьменко наведено причини та обставини виникнення понад 410 газо-нафто-водопроявів та відкритих фонтанів, в середньому біля 8 фонтанів щорічно [2]. Наведені дані дають можливість оцінити глобальні наслідки, які виникають при даного роду аварійних ситуаціях. Дослідження А.П. Хаустова і М.М. Редіна [3] вказують на те, що значний вплив при аварійному фонтануванні відбувається на атмосферне повітря, куди