

Процедура реалізації методу штучного осадження радіоактивних речовин з атмосфери

- **Кустов М. В.**
Національний університет цивільного захисту України, м. Харків, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6960-6399>
- **Слепужніков Є. Д.**
Національний університет цивільного захисту України, м. Харків, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5449-3512>
- **Липовий В. О.**
Національний університет цивільного захисту України, м. Харків, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1967-0720>
- **Хмиров І. М.**
Національний університет цивільного захисту України, м. Харків, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7958-463X>
- **Дадашов Ільгар Фірдовсі огли**
Академія МНС Азербайджанської Республіки, м. Баку, Азербайджан
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1533-1094>
- **Баскін О. М.**
Університет Грінвіча, Старий Королівський військово-морський коледж, Лондон, Об'єднане Королівство Великої Британії та Північної Ірландії
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8438-0618>

Проведені дослідження процесів ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій на об'єктах атомноенергетичного комплексу з викидом газоподібних та дисперсних радіоактивних речовин в атмосферу, дозволили розробити процедуру практичної реалізації даного методу. Метод ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій спрямований на осадження з атмосфери небезпечних радіоактивних речовин атмосферними опадами. Представлена процедура дозволяє вирішити три основні завдання ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій — це моніторинг зони ураження, прийняття ефективного управлінського рішення та безпосередній вплив на зону ураження від надзвичайної ситуації. З метою розширення можливостей існуючих методик прогнозування зон забруднення запропонована їх модифікація з урахуванням особливостей випадіння опадів. Використання даної процедури дозволяє мінімізувати масштаби великих надзвичайних ситуацій регіонального та державного рівнів. За рахунок використання методів штучного опадоутворення, як передбачено в процедурі, існує можливість осадження небезпечних радіоактивних речовин з висоти кількох кілометрів, що неможливо реалізувати іншими відомими методами. Розроблені алгоритм дій і процедура реалізації методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій шляхом штучного ініціювання опадів, є базою для розробки методики дій практичних аварійно-рятувальних підрозділів при ліквідації надзвичайних ситуацій регіонального та державного рівнів.

Таким чином, є підстави стверджувати, що використання запропонованої процедури дозволить підвищити ефективність ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного характеру з викидом в атмосферу небезпечних радіоактивних речовин.

Ключові слова: надзвичайні ситуації техногенного характеру, викид в атмосферу радіоактивних речовин, осадження небезпечних речовин з атмосфери, алгоритм дій, процедура реалізації методу.

© Кустов М. В., Слепужніков Є. Д., Липовий В. О., Хмиров І. М., Дадашов Ільгар Фірдовсі огли, Баскін О. М., 2019

Науково-технічний та промисловий розвиток держави супроводжується збільшенням кількості потенційно небезпечних об'єктів. У зв'язку з чим збільшується ризик виникнення надзвичайних ситуацій (НС) техногенного характеру. Особливу небезпеку представляють об'єкти атомно-енергетичного комплексу, які активно використовуються в Україні. НС техногенного характеру на об'єктах атомноенергетичного комплексу супроводжуються значними розмірами зони ураження як по площі, так і по висоті в атмосфері, яка досягає декількох кілометрів. Тому мінімізація зони ураження при таких аваріях потребує залучення значних ресурсів. Існуючі на сьогодні підходи до ліквідації наслідків НС техногенного характеру з використанням існуючої матеріально-технічної бази дозволяють активно впливати на НС на висотах до сотні метрів, за рахунок чого їх використання є малоефективними. Охопити значну зону ураження дозволяють такі атмосферні процеси як опади. Атмосферні опади дозволяють осаджувати з атмосфери небезпечні хімічні та радіоактивні речовини у газоподібному або дисперсному стані. Однак атмосферні опади носять ймовірнісний характер, що обумовлює необхідність використання методів штучного впливу на атмосферні процеси для підвищення ефективності процесів ліквідації наслідків НС в атмосфері. За рахунок складності таких процесів першочерговим є прогнозування їх ефективності та впливу на супутні системи. Питання моделювання процесів опадоутворення та аварій з викидом в атмосферу радіоактивних речовин, є багатофакторною задачею, яка повинна враховувати як метеорологічні процеси, так і складну фізико-хімічну структуру забруднюючих речовин.

Виходячи із цих позицій, актуальними слід вважати дослідження, спрямовані на розробку методів ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного характеру на об'єктах атомноенергетичного комплексу, які характеризуються наявністю у атмосферному повітрі радіоактивних речовин, з використанням методів штучного опадоутворення.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Серед небезпечних факторів надзвичайних ситуацій, найбільш суттєвий вплив на атмосферу чинять забруднення різної фізичної та хімічної природи [1]. Однак екологічна ситуація в регіоні різко погіршується при виникненні аварій на хімічних підприємствах [2]. За рахунок хімічної реакції небезпечних газів з активними компонентами атмосфери можуть синтезуватися нові хімічні сполуки, що призводить до випадіння «кислотних опадів» [3].

У результаті аварійної розгерметизації ядерного реактора в атмосферу потрапляє велика кількість газоподібних та аерозольних радіоактивних речовин [4]. Радіонуклідний склад забруднень при аваріях на Чорнобильській АЕС та АЕС Фукусима-1 проаналізовано в роботах [5, 6].

Існуючі у світі підходи до ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій (НС), які характеризуються викидом в атмосферне повітря шкідливих та радіоактивних речовин, засновані на використанні рідинних завіс за допомогою наземної аварійно-рятувальної техніки [7]. Найбільшу ефективність мають дрібнодисперсні водяні завіси [8]. Однак забезпечити високу дисперсність водяного потоку та дальність її подавання вкрай важко [9]. Такий метод забезпечує зону мінімізації висотою не більше десятків метрів [10]. Однак при виникненні НС техногенного характеру зона ураження атмосферного повітря досягає висоти до декількох кілометрів [11]. Відповідно обов'язковими етапами ліквідації наслідків НС є моніторинг стану атмосфери [12], прогнозування розвитку НС [13] та безпосередній вплив на зону ураження.

На сьогоднішній день процес очищення повітря нижньої атмосфери здійснюється лише природним шляхом — гравітаційне осадження, зниження концентрації за рахунок вітрових потоків та осадження забруднень атмосферними опадами. Найбільш ефективним механізмом є осадження забруднюючих речовин опадами [14]. Однак мимовільне випадання атмосферних опадів з необхідною інтенсивністю над зоною забруднення відбувається вкрай рідко. Відповідно, одним зі шляхів

рішення проблеми ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного або техногенного характеру є штучне ініціювання атмосферних опадів [15]. На сучасному етапі найбільш ефективним способом штучного ініціювання опадів є розпилення активного реагенту у зоні опадоутворення [16]. Однак ефективність ліквідації наслідків НС залежать від метеорологічних умов, виду забруднюючої речовини, класу активного реагенту та способу доставки його у зону опадоутворення [17].

Відсутність комплексного підходу до вирішення проблеми осадження радіоактивного забруднення з атмосферного повітря на висотах декількох кілометрів обумовлюють необхідність проведення досліджень в цьому напрямку.

Мета та задачі дослідження

Проведені дослідження ставили за мету розробку практичної процедури реалізації методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного характеру, що призводять до викиду газоподібних та дисперсних небезпечних радіоактивних речовин в атмосферу.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- розробити алгоритм методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій шляхом осадження з атмосфери небезпечних речовин;
- розробити процедуру реалізації методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та дисперсних речовин;
- перевірити ефективність запропонованої процедури реалізації методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій на прикладі аварії на атомній електростанції.

Керуючий алгоритм методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій шляхом осадження з атмосфери небезпечних речовин

Згідно вимог МАГАТЕ [18] при ліквідації радіаційних аварій створюється аварійний штаб до якого входять керівники

та представники об'єкту, на якому сталося аварія; аварійно-рятувальних служб; служб цивільного захисту регіону, де сталася аварія; медичних служб; поліції; місцевих органів влади та інших служб та відомств за необхідності. Кожен представник аварійного штабу виконує розпорядження керівника ліквідації аварії та керує силами та засобами свого відомчого підпорядкування. При цьому представники експлуатуючої організації вживають всіх необхідних заходів для мінімізації наслідків аварії та локалізації небезпеки [19].

При ліквідації радіаційної аварії дії штабу спрямовуються на: запобігання руйнуванню активної зони реактору; підтримання цілісності захисної оболонки; мінімізації викидів радіоактивних речовин назовні; стабілізації роботи обладнання [20]. Але, на жаль, не завжди вдається повністю запобігти викиду радіоактивних речовин в навколишнє середовище, тому є необхідність у створенні методів запобігання розповсюдження радіоактивних речовин в атмосфері.

Схема керуючого алгоритму організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та дисперсних речовин представлено на рис. 1.

Він складається із 14 блоків, розміщених на трьох ієрархічних рівнях, зв'язаних прямими та зворотними зв'язками. На першому ієрархічному рівні знаходиться 4 блоки. На першому етапі відбувається отримання інформації про аварію або від встановлених засобів автоматичної сигналізації; або від чергової на об'єкті особи. Для проведення якісного аналізу зон радіоактивного прогнозування необхідно отримати точну інформацію про основні метеорологічні параметри.

Оперативну інформацію надає державна чи регіональна служба гідрометеорології. Уточнення отриманих та отримання додаткових даних про характер аварії та метеорологічні умови проводиться шляхом проведення розвідки зони надзвичайної ситуації та метеоумов з використанням супутникових, стаціонарних та оперативних засобів моніторингу.

На другому ієрархічному рівні знаходиться 6 блоків. Володіючи даними про характер надзвичайної ситуації та метеорологічні умови проводиться прогнозування зон

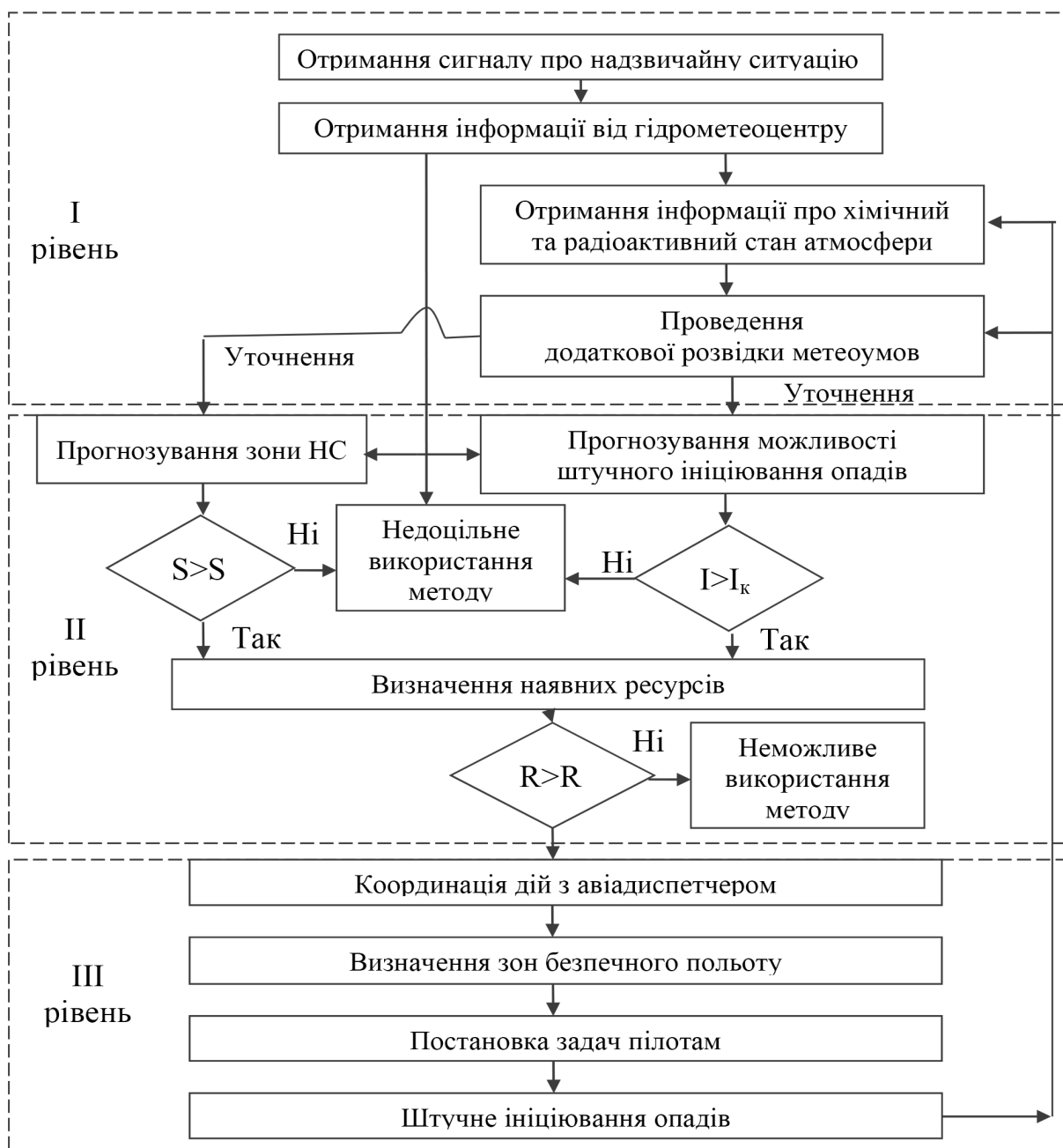


Рисунок 1 — Керуючий алгоритм реалізації організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та дисперсних речовин

ураження від надзвичайної ситуації та оцінка можливості штучного ініціювання опадів.

Наступним кроком є порівняльна уцінка результатів прогнозування для визначення доцільності використання організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного характеру, шляхом осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та дисперсних радіоактивних речовин.

Якщо використання методу є доцільним, то визначаємо наявні ресурси

для використання організаційно-технічного методу ліквідації наслідків. При наявності необхідної кількості сил та засобів переходимо до третього ієрархічного рівня. За умов відсутності необхідних ресурсів використання запропонованого методу є неможливим.

На третьому ієрархічному рівні розташовано 4 блоки. При отриманні управлінського рішення про використання організаційно-технічного методу ліквідації

наслідків надзвичайних ситуацій техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та дисперсних речовин, проводиться координація дій з авіадиспетчерською службою району. Після чого визначаються зони безпечних польотів та ставляться задачі пілотам по засіву хмар реагентом. З урахуванням інерційності процесу проводиться штучне ініціювання опадів.

Активні дії з виконання керівного рішення з впливом на атмосферні процеси замикають контур управління.

Результати розробки процедури застосування методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій шляхом осадження з атмосфери небезпечних речовин

Організаційно-технічний метод призначений для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та дисперсних радіоактивних речовин штучно ініційованими опадами.

Використання даного методу передбачає виконання наступних процедур:

1. Отримання моніторингової інформації.
2. Розрахунок часу вільного розповсюдження зони ураження у атмосфері.
3. Визначення розмірів прогнозованої зони атмосферного ураження.
4. Проведення оцінки належності площі НС області припустимих рішень.
5. Залучення сил та засобів для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

Детальний опис процедур наведено нижче.

Необхідний комплекс моніторингової інформації

Включає: час та місце виникнення аварії; вид та кількість викинутої в атмосферу небезпечної речовини; метеорологічні параметри атмосфери; існуючі у розпорядженні сили та засоби; характеристика району,

де виникла надзвичайна ситуація (наявність небезпечних об'єктів, кількість населення, характер забудови, рельєф місцевості та ін.).

Розрахунок часу вільного розповсюдження зони ураження у атмосфері τ

Визначається часом від початку викидання небезпечної речовини до початку випадіння атмосферних опадів над зоною ураження:

$$\tau = \tau_{\text{виявл.}} + \tau_{\text{спов.}} + \tau_{\text{п.р.}} + \tau_{\text{збору}} + \tau_{\text{слід.}} + \tau_{\text{розгорт.}} + \tau_{\text{інерції}}, \quad (1)$$

де $\tau_{\text{виявл.}}$ — час виявлення надзвичайної ситуації; $\tau_{\text{спов.}}$ — час сповіщення потенціального керівника ліквідації НС; $\tau_{\text{п.р.}}$ — час прийняття управлінського рішення відповідальною особою; $\tau_{\text{збору}}$ — час збору залучених сил та засобів; $\tau_{\text{слід.}}$ — час слідування залучених сил та засобів до місця активного впливу на атмосферні процеси; $\tau_{\text{розгорт.}}$ — час розгортання технічних засобів та приготування їх до роботи; $\tau_{\text{інерції}}$ — час інерції від початку активного впливу до випадіння опадів.

Час виявлення виникнення надзвичайної ситуації залежить від класу НС. Мінімальний час виявлення буде на об'єктах атомної промисловості за рахунок великого ступеню автоматизації. Час сповіщення потенціального керівника ліквідації НС визначається часом передачі необхідної інформації по відповідним інстанціям об'єктового, місцевого, регіонального та державного рівнів. При цьому необхідно спрогнозувати можливу зону ураження за методикою [21] з урахуванням часу до початку процесу осадження забруднення. Час збору залучених сил та засобів визначається часом збору залучених людей, та часом підготовки техніки до виїзду (вильоту) та до виконання поставлених задач. Для літаків $\tau_{\text{збору}} \approx 30-40$ хв. Час слідування до місця активного впливу визначається відстанню від місць базування (L) та швидкістю руху транспортного засобу (v). Літаки по прибуттю у зону впливу відразу починають засів хмари. Час інерції від початку активного впливу до випадіння опадів залежить від методу впливу та метеорологічних умов, та лежить в межах $\tau_{\text{інерції}} \approx 15-30$ хв.

Визначення розмірів прогнозованої зони атмосферного ураження.

Користуючись даними по інтенсивності викиду (I) та часом викиду (τ) визначається кількість викинутої речовини: $C = I \cdot \tau$.

Далі за методикою прогнозування зон радіоактивного забруднення [21] визначають розміри зони ураження при НС. Однак, в цій методиці не враховується наявність опадів в зоні НС, що призводить до звуження умов її використання.

Аварійне прогнозування зон забруднення при виникненні аварії на підприємстві відіграє важливу роль для правильної організації евакуації населення й аварійно-рятувальних робіт. На розміри зони радіаційного забруднення впливають масштаб існуючої або прогнозованої аварії, вид небезпечної речовини, що викидається в атмосферу, та метеорологічні умови. Серед метеоумов, крім температури повітря, швидкості та напрямки вітру, найважливішу роль відіграє наявність та інтенсивність опадів над зоною забруднення.

Відповідно до методики [21] геометричні розміри зони забруднення визначаються глибиною зони забруднення Γ :

– площа зони можливого радіаційного забруднення:

$$S_{ЗВХЗ} = 8,72 \cdot 10^{-3} \cdot \Gamma^2 \cdot \varphi; \quad (2)$$

– площа прогнозованої зони радіаційного зараження:

$$S_{ПЗХЗ} = K \cdot \Gamma^2 \cdot N^{0,2}, \quad (3)$$

де φ — коефіцієнт, що умовно дорівнює кутівому розміру; K — коефіцієнт, що залежить від ступеня вертикальної стійкості повітря; N — час, на який розраховується глибина зони.

Площа та ширина прогнозованої зони радіаційного забруднення залежить від ступеня вертикальної стійкості повітря, що залежно від відношення температур повітря та поверхні Землі розділяється на конвекцію,

інверсію та ізотермію. Хмарній погоді, при якій і випадають опади, відповідно до Методики, відповідає інверсія. Як видно із залежностей (2) та (3), розміри зони зараження визначаються її глибиною. Для простоти використання методики в практичній діяльності значення глибини зони радіаційного забруднення перелічені для певної швидкості вітру. Наявність опадів над зоною забруднення ($\Gamma_{\text{опадів}}$) враховується шляхом введення поправочного коефіцієнта k :

$$\Gamma_{\text{опадів}} = \Gamma \cdot k. \quad (4)$$

Так як зона забруднення може мати довжину до 100 км, то опади можуть випасти не над всією зоною. Тому, запропоновано розбити зону забруднення на три ділянки, по області випадання опадів.

Так, як концентрація небезпечної речовини при віддаленні від осередку викиду знижується, то й поправочні коефіцієнти різні по зонах. Опади можуть випасти й у декількох зонах (рис. 2) одночасно, при цьому поправочні коефіцієнти складаються:

$$k = \frac{k_1 + k_2 + k_3}{3}. \quad (5)$$

Відповідно, при відсутності опадів над певною зоною, поправочний коефіцієнт для цієї зони дорівнює одиниці. Розбивка на зони дозволить врахувати нерівномірність опадів по зоні забруднення, не ускладнюючи при цьому методику прогнозування.

Поправочні коефіцієнти k_i розраховувалися зі співвідношення:

$$k_i = \frac{\Gamma'_{i(\text{опадів})}}{\Gamma} \quad (6)$$

де $\Gamma'_{i(\text{опадів})}$ — глибини зони забруднення при випаданні опадів над i -тою зоною, розрахована з використанням моделей динаміки осадження забруднень опадами.

Глибина зони визначається відстанню від джерела викиду до точки, у якій сумарний рівень внутрішнього та зовнішнього опромінення досягає граничних показників по санітарно-епідеміологічним нормам [22]. Приймаючи припущення, що активність радіоактивних часток має нормальний

логарифмічний розподіл, загальна інтенсивність радіоактивного випромінювання в точці буде визначатись концентрацією радіоактивних часток. Відповідно нам необхідно знайти розподіл концентрації небезпечної речовини по напрямку вітру ($C_r(x)$) із граничною умовою:

$$x = \Gamma, C_r(\Gamma) = C_{\text{norm}}$$

Описання руху дисперсних часток сферичної форми у найпростішому випадку здійснюється з використанням формули Стокса:

$$\frac{dw_d}{d\tau} = g - \frac{w_d - w_a}{m_d} \cdot \rho_a \times \left[6 \cdot \pi \cdot r_d \cdot \nu_a + \frac{C_f}{2} \cdot \pi \cdot r_d^2 \cdot |w_d - w_a| \right], \quad (7)$$

де w_d , w_a — швидкості дисперсної радіоактивної частинки та повітря; ρ_a — густина повітря; ν_a — коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря; g — прискорення вільного падіння; C_f — коефіцієнт форми (для частинок сферичної форми $C_f = 0,47$); m_d — маса дисперсної радіоактивної частинки.

При випадінні атмосферних опадів над зоною викиду радіоактивної хмари відбувається осадження небезпечних речовин з атмосфери за рахунок їх сорбції на поверхні краплі. При цьому осадження відбувається за механізмом гравітаційної коагуляції. Сутність механізму гравітаційної коагуляції полягає у захопленні великою краплею дощу при падінні дрібних дисперсних часток. Дрібні аерозольні частки з радіусом r_d і концентрацією C_d під дією повітряних потоків витають у повітрі. Під дією сил тяжіння краплі опадів розміром r_r рухаються вниз із деякою швидкістю V_r . При падінні великої краплі її обтікає потік повітря, що захоплює за собою дрібні аерозольні частки. Однак оскільки аерозольні частки мають відмінну від нуля масу, на них діють інерційні сили, що прагнуть зберегти прямолінійну траєкторію. Імовірність зіткнення великої краплі із дрібною (коефіцієнт захоплення K_g) залежить від їх взаємних розмірів, в'язкості середовища (η) та швидкості руху.

При осадженні дисперсних часток опадами за механізмом гравітаційної коагуляції

швидкість процесу визначається рівнянням [23]:

$$-\left(\frac{dC_d}{d\tau}\right) = C_r \frac{\pi}{4} \int_0^R K_g \cdot (r_r + r_d)^2 \cdot V_r \cdot C_d \cdot r_d \cdot \quad (8)$$

де r_r , C_r , V_r — радіус крапель опадів, їх концентрація та швидкість падіння; K_g коефіцієнт захоплення часток краплями.

Концентрація водяних крапель (C_{drop}) та їх розмір (R) визначаються інтенсивністю опадів (I).

З використанням рівнянь (7), (8) можна розрахувати поправочні коефіцієнти k_i для прогнозування розмірів зон радіоактивного забруднення через 1 годину випадання опадів (табл. 1).

Так як ширина зони набагато менше її довжини, то для розрахунку ширини зони радіаційного забруднення розбивка її на підзони недоцільна. Для простоти використання методик та швидкості прогнозування поправочні коефіцієнти наведені в розрахованому вигляді з певним кроком інтенсивності опадів (табл. 1).

Як видно з табл. 1, найбільший вплив на зниження розмірів зони забруднення

Таблиця 1 — Поправочні коефіцієнти для розрахунку глибини та ширини зони радіаційного зараження

Інтенсивність опадів, мм-год ⁻¹	Глибина зони			Ширина зони
	k1	k2	k3	
0,25	0,78	0,89	0,92	0,97
0,5	0,65	0,77	0,83	0,91
1	0,57	0,65	0,71	0,85
5	0,46	0,53	0,62	0,79
10	0,35	0,44	0,56	0,72
20	0,30	0,37	0,45	0,66
30	0,23	0,30	0,39	0,61
40	0,19	0,22	0,32	0,57
50	0,16	0,18	0,26	0,53
70	0,10	0,13	0,21	0,42
100	0,08	0,09	0,17	0,34

чинять опади над осередком викиду, де в атмосфері присутня максимальна концентрація небезпечних речовин. При радіаційному забрудненні інтенсивність очищення атмосфери опадами вище у порівнянні з осадженням газів за рахунок високої інтенсивності сорбції твердих аерозольних часток.

І хоча опади інтенсивністю більше $50 \text{ мм} \cdot \text{ч}^{-1}$ над територією України вкрай рідкісне явище, дощі середньої інтенсивності знижують глибину зони зараження більш ніж в 2 рази.

Проведення оцінки належності площі НС ($S_{\text{НС}}$) області припустимих рішень:
 $S_{\text{опт}} < S_{\text{НС}} < S_{\text{max}}$

Цільовою функцією даної задачі є площа зони ураження S , яка залежить від цілого ряду параметрів. Так, залучення сил та засобів для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, розробленим в роботі методом потребує певних матеріальних витрат. Тому попередньо необхідно визначити зони прийняттого економічного ефекту від використання запропонованого методу ліквідації наслідків НС. Для оцінки економічної ефективності використання, запропонованого в роботі методу, проведена порівняльна оцінка екологічного збитку (Z) від НС з економічними витратами (B) на ліквідацію наслідків НС. Умовою економічної доцільності буде такий вираз:

$$Z \geq B \quad (9)$$

Детальний розрахунок збитків можливо провести лише для конкретної надзвичайної ситуації, але залежність збитків від площі ураження у загальному вигляді можна представити так, як показано на рис. 2.

Витрати на ліквідацію наслідків НС визначаються кількістю залучених сил та засобів, які, в свою чергу, визначаються виходячи із площі ураження, виду забруднюючої речовини, метеорологічних умов та існуючих у розпорядженні ресурсів. Оцінити кількість витрат на ліквідацію наслідків НС можливо лише для конкретного прикладу НС, але необхідна кількість сил та засобів від площі ураження має прямо пропорційну залежність.

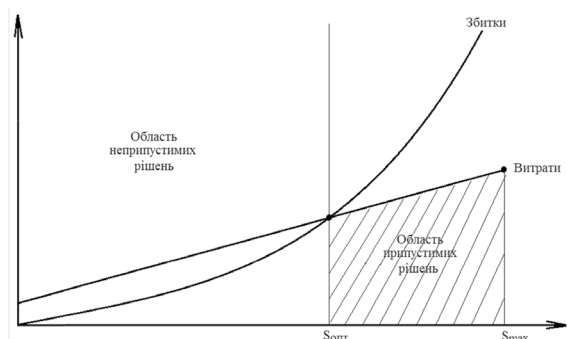


Рисунок 2 — Характер залежностей збитків (Z) та витрат (B) в залежності від площі ураження від НС

Як видно з рисунку 2, існує площа ураження ($S_{\text{опт}}$), для якої виконується умова $Z = B$. Область $S < S_{\text{опт}}$ є областю неприпустимих рішень, коли витрати на ліквідацію наслідків перевищують збитки від НС.

Виходячи з цього, значення $S_{\text{опт}}$ визначає доцільність використання запропонованого в роботі методу ліквідації наслідків НС для атмосфери. Крім цього, верхньою границею площі зони ураження є наявні в Україні людські та матеріальні ресурси для мінімізації наслідків.

Залучення сил та засобів для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного характеру з викидом в атмосферу небезпечних радіоактивних речовин

При аналізі резерву сил та засобів в Україні за основу візьмемо кількість літаків, придатних до застосування піропатронів. Вся авіація ДСНС України підпорядкована спеціалізованому авіаційному загону Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту, що базується у м. Ніжин Чернігівської області. САЗ ДСНС України має 4 літаки АН-32П, 1 транспортний літак АН-26 та 3 вертольоти МІ-8. Літаки АН-32П та АН-26 за своїми тактико-технічними характеристиками (ТТХ) можуть виконувати задачі засіву хмар реагентом. До основних ТТХ АН-32П відносяться: вантажопідйомність — 6700 кг; дальність польоту — 2000 км; практична висота польоту — 9400 м. Але для використання в якості

носія пірозарядів необхідне їх додаткове обладнання двома системами відстрілу піропатронів «АСО-2И» на 320 піропатронів.

Згідно багатьох експериментальних та теоретичних даних мінімальна витрата кристалуютьорюючих реагентів подібного класу становить порядку 0,3–1,2 г/км² [24]. Однак у практиці штучного ініціювання опадів рекомендується використовувати 3–5 кратний запас реагенту [25]. Відповідно, при використанні розроблених в роботі піроскладів, для засіву 1 км² хмар необхідно 15 піропатронів.

Додатковими обмеженнями є максимальна кількість піропатронів на 1 літаку — 320 шт., а також неможливість працювати в одній зоні літакам та випромінювачам.

Підчас прийняття управлінського рішення відповідальна особа оцінює умову (9), визначається з кількістю залучених сил та засобів та діє по алгоритму, розробленому в пункті 4.

Розроблена процедура може стати складовою частиною загального Аварійного плану, який розробляється згідно вимог Державних стандартів. Для України основним регламентуючим документом є Норми радіаційної безпеки України [22], які визначають контрзаходи з ліквідації радіаційної аварії, що поділяються на термінові, невідкладні та довгострокові. Однак заходи з мінімізації зони радіоактивного ураження місцевості не визначені. На наш погляд, за оперативністю реагування та важливістю їх слід віднести до невідкладних контрзаходів. Аварійний план для АЕС повинен розроблятися експлуатуючою організацією, в Україні це ДП «НАЕК «Енергоатом». Ця організація розробила Систему аварійної готовності та реагування на аварії та надзвичайні ситуації на АЕС України (САР ДП «НАЕК «Енергоатом»), яка направлена на підвищення рівня безпеки експлуатації об'єктів атомної енергетики. Для ефективного функціонування запропонованого в роботі методу необхідна його інтеграція у всі складові САР (нормативно-правової бази, аварійних планів, аварійних організаційних структур, засобів аварійного реагування, системи підготовки персоналу та протиаварійних тренувань, системи взаємодії із зовнішніми організаціями) [26].

Обговорення результатів розробки процедури застосування методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій шляхом осадження з атмосфери небезпечних речовин

Розглянемо можливості використання запропонованої методики на прикладі аварії на Чорнобильській АЕС з відомими параметрами аварії. Прийнемо додаткові умови з урахуванням залучення сил та засобів САЗ ДСНС України у м. Ніжин Чернігівської області: $\tau_{\text{виявл.}} = 0$ хв.; $\tau_{\text{спов.}} = 20$ хв; $\tau_{\text{п.р.}} = 20$ хв; $\tau_{\text{збору.}} = 20$ хв; $\tau_{\text{слід.}} = 17$ хв; $\tau_{\text{розгорт.}} = 0$ хв; $\tau_{\text{інерції.}} = 25$ хв. Таким чином, час вільного розповсюдження радіоактивної хмари у атмосфері становить — $\tau = 102$ хв.

Користуючись параметрами аварії у перші години [27] та методикою розрахунку зони радіоактивного забруднення [21] визначаємо площу зони ураження атмосфери через 102 хв (рис. 3).

На даному етапі аварії виконується умова $S_{\text{НС}} < S_{\text{max}}$. Виходячи з того, що аварія не локалізована та продовжується викид радіоактивних речовин виконується і умова $S_{\text{опт}} < S_{\text{НС}}$.

Розрахуємо необхідну кількість піропатронів:

$$N_{\text{п/п}} = 15 \cdot 23 = 345 \text{ шт.}$$

Відповідно, для мінімізації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС необхідно задіяти 2 літака АН-32П. Однак, так як викид радіоактивних речовин в атмосферу із зруйнованого реактору продовжувався більше 102 хв, то доречно організувати позмінну роботу груп по 2 літаки. При несприятливих метеорологічних умовах для хімічного методу інтенсифікації опадів необхідно додатково оцінити можливість використання електрофізичного методу.

Висновки

1. Розроблено керуючий алгоритм організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери



Рисунок 3 — Зона радіоактивного забруднення атмосфери під час аварії на Чорнобильській АЕС на момент 102 хв від вибуху реактора: $S_{НС} = 23 \text{ км}^2$

небезпечних газоподібних та дисперсних речовин, який складається із 14 блоків, розміщених на трьох ієрархічних рівнях, зв'язаних прямими та зворотними зв'язками.

2. Використання методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій шляхом осадження з атмосфери небезпечних радіоактивних речовин передбачає використання п'яти процедур, а саме: отримання моніторингової інформації; розрахунок часу вільного розповсюдження зони ураження у атмосфері; визначення розмірів прогнозованої зони атмосферного ураження; проведення оцінки належності площі НС області припустимих рішень; залучення сил та засобів для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

3. Перевірка ефективності запропонованої процедури реалізації методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій на прикладі осадження радіоактивної хмари при умовах

аварії на Чорнобильській АЕС у 1986 році показала, що за сприятливих метеорологічних умов розміри зони забруднення атмосфери можливо було локалізувати у межах 23 км^2 .

Список використаної літератури

1. Соболевич Э.В., Довгий С.А., Лысенко О.Б. Экологическая энциклопедия: [в 5 т.]. Киев: Логос, Т. 3, 2012. 970 с.
2. Исаева Л.К. Экология пожаров, техногенных и природных катастроф. М.: Академия ГПС МВД России, 2000. 301 с.
3. Kustov M.V. The study of formation and acid precipitation dynamics as a result of big natural and man-made fires. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 1, Issue 10 (72). P. 11–17. Doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.59685>.

4. NRA. Readings of Environmental Radiation Level by emergency monitoring (March 2011). — URL: <http://radioactivity.nsr.go.jp/en/list/207/list-201103.html>.
5. Stohl A. Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition. *Atmos. Chem. Phys.* 2012. № 12. pp. 2313–2343.
6. Zheng J., Tagami K., Watanabe Y. Isotopic evidence of plutonium release into the environment from the Fukushima DNPP accident. *Sci. Rep.* 2012. № 2. pp. 304–311.
7. Emergency Response Guidebook 2016, U.S. Department of Transportation Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration. Washington, 2016. 136 p.
8. Dubinin D., Korytchenko K., Lisnyak A., Hrytsyna I., Trigub V. Improving the installation for fire extinguishing with finelydispersed water. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2018. Vol. 2, № 10 (92). P. 38–43. Doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.127865>.
9. Korytchenko K., Sakun O., Dubinin D., Khilko, Y., Slepuzhnikov E., Nikorchuk A., Tsebruk I. Experimental investigation of the fire-extinguishing system with a gas-detonation charge for fluid acceleration. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2018. Vol.3, № 5(93). pp. 47–54. Doi:<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.134193>.
10. Guidelines for Mass Casualty Decontamination During a HAZMAT/ Weapon of Mass Destruction Incident. Volumes I and II. U.S. Army Chemical, Biological, Radiological and Nuclear School. USA. 2016. 136 p.
11. Yoshenko V.I. Resuspension and redistribution of radionuclides during grassland and forest fires in the Chernobyl exclusion zone. Part I: Fire experiments *J. Environ. Radioactiv.* 2006. № 86. pp. 143–163.
12. Pospelov B., Rybka E., Meleshchenko R., Borodych P., Gornostal S. Development of a method for rapid detection of dangerously polluted atmosphere in cities using recurrent measures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2019. V. 1 (97). № 10. pp. 34–40.
13. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Meleshchenko R., Gornostal S. Analysis of correlation dimensionality of the state of a gas medium at early ignition of materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2018. V. 5 (95). № 10. pp. 25–30.
14. Brennan W.J., Schultz P.A. Atmospheric Aerosol Properties and Climate Impacts. U.S. Climate Change Science Program Synthesis and Assessment Product. 2009. 128 p.
15. Jin R., Wang W., Song W., Wang Z. Tianjin Precipitation Feature and Analysis of Weather Modification Influence. *Proceedings of the 10th WMO scientific conference on weather modification.* Bali, Indonesia. 2011. pp. 127–132.
16. Abdulla M.Sc., Al Mandoos A.Y. Analysis of the cumulonimbus clouds characteristics and the efficiency of the precipitation enhancement over the eastern area of the UAE. *Beograd.* 2012. 119 p.
17. Kustov M.V., Kalugin V.D., Tutunik V.V., Tarakhno E.V. Physicochemical principles of the technology of modified pyrotechnic compositions to reduce the chemical pollution of the atmosphere. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2019, No. 1, pp. 92–99. Doi: <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2019-122-1-92-99>.
18. Generic procedures for assessment and response during a radiological emergency IAEA-TECDOC-1162. IAEA. Vienna, 2000. 193 p.
19. Nuclear accident knowledge taxonomy. IAEA. Vienna, 2016. 52 p.
20. Severe accident management programmes for nuclear power plants. IAEA. Vienna, 2009. 83 p.
21. Методика по прогнозированию и оценке радиоактивного загрязнения воздуха, почвы, водных объектов, а также возможных доз облучения в случае радиационных аварий на АЭС для различных вариантов метеорологических условий. М.: Госкомгидромет. 1988. 100 с.
22. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). Київ, 1997, 115 с. — URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0062282-97>.
23. Ивлев Л.С., Довгальук Ю.А. Физика атмосферных аэрозольных систем. СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999, 194 с.
24. Haryanto U., Goenawan R.D., and Harsanti D. The Development of Hygroscopic Cloud Seeding Flare In Indonesia: Evaluation and Measurement of Distribution Particles. URL: http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/OBS.Haryanto_Indonesia_paper_1.pdf.
25. Козлов В.Н., Клинго В.В., Лихачев А.В., Окунев С.М., Щербаков А.П. Шукин Г.Г. Порядок проведения работ по искусственному вызыванию осадков из конвективных облаков при борьбе с лесными пожарами с борта легкомоторных воздушных судов. СПб.: Гидрометеиздат. 2002. 24 с.
26. Основні положення організації системи готовності та реагування ДП «НАЕК «Енергоатом» на аварії та надзвичайні ситуації на АЕС. ПЛ-Д.0.03.089–15 / Київ, 2015, 76 с.
27. UNSCEAR 2000. Exposures and effects of the Chernobyl accident (Annex J). New York: United Nations. URL: <http://www.unece.org/docs/reports/annexj.pdf>.

References

1. Sobotovich, E.V., Dovgij, S.A., Lyisenko, O.B. (2012). *Environmental encyclopedia*. Kyiv, Logos, No. 3, 970.

2. Isaeva, L.K. (2000). *Ecology of fires, man-made and natural disasters*. Moscow, Akademiya GPS MVD Rossii, 301.
3. Kustov M.V. (2016). *The study of formation and acid precipitation dynamics as a result of big natural and man-made fires*. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 10 (72), pp. 11–17. Retrieved from <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.59685>.
4. NRA. *Readings of environmental radiation level by emergency monitoring*. Retrieved from <http://radioactivity.nsr.go.jp/en/list/207/list-201103.html>
5. Stohl, A. (2012). *Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition*. Atmos. Chem. Phys, 12, pp. 2313–2343.
6. Zheng, J., Tagami, K., Watanabe, Y. et al. (2012). *Isotopic evidence of plutonium release into the environment from the Fukushima DNPP accident*. Sci. Rep, 2, pp. 304–311.
7. *Emergency Response Guidebook* (2016). U.S. Department of Transportation Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, Washington, 136.
8. Dubinin, D., Korytchenko, K., Lisnyak, A., Hrytsyna, I., Trigub, V. (2018). *Improving the installation for fire extinguishing with finely dispersed water*. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 10 (92), pp. 38–43. Retrieved from <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.127865>.
9. Korytchenko, K., Sakun, O., Dubinin, D., Khilko, Y., Slepuzhnikov, E., Nikorchuk, A., Tsebriuk, I. (2018). *Experimental investigation of the fire-extinguishing system with a gas-detonation charge for fluid acceleration*. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5 (93), pp. 47–54. Retrieved from <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.134193>.
10. *Guidelines for Mass Casualty Decontamination During a HAZMAT/ Weapon of Mass Destruction Incident* (2016). Volumes I and II, U.S. Army Chemical, Biological, Radiological and Nuclear School, USA, 136.
11. Yoshenko, V.I. (2006). *Resuspension and re-distribution of radionuclides during grassland and forest fires in the Chornobyl exclusion zone*. Part II: Modeling the transport process, J. Environ, Radioactiv, 86, pp. 260–278.
12. Pospelov, B., Rybka, E., Meleshchenko, R., Borodych, P., Gornostal, S. (2019). *Development of a method for rapid detection of dangerously polluted atmosphere in cities using recurrent measures*. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (97), pp. 34–40.
13. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Meleshchenko, R., Gornostal, S. (2018). *Analysis of correlation dimensionality of the state of a gas medium at early ignition of materials*. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5 (95), pp. 25–30.
14. Brennan, W.J., Schultz, P.A. (2009). *Atmospheric aerosol properties and climate impacts*. U.S. Climate Change Science Program Synthesis and Assessment Product, 128.
15. Jin, R., Wang, W., Song, W., Wang, Z. (2012). *Tianjin precipitation feature and analysis of weather modification influence*. Proceedings of the 11th WMO scientific conference on weather modification, Bali, Indonesia, pp. 127-132.
16. Abdulla, M.Sc., Al Mandoos, A.Y. (2012). *Analysis of the cumulonimbus clouds characteristics and the efficiency of the precipitation enhancement over the eastern area of the UAE*, Beograd, 119.
17. Kustov, M.V., Kalugin, V.D., Tutunik, V.V., Tarakhno, E.V. (2019). *Physicochemical principles of the technology of modified pyrotechnic compositions to reduce the chemical pollution of the atmosphere*. Chemistry and Chemical Technology Issues, 1, pp. 92–99. Retrieved from <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2019-122-1-92-99>.
18. IAEA-TECDOC-1162. *Generic procedures for assessment and response during a radiological emergency*. IAEA, Vienna, 2000, 193.
19. *Nuclear accident knowledge taxonomy*. IAEA, 2016, Vienna, 52.
20. *Severe accident management programmes for nuclear power plants*. IAEA, Vienna, 2009, 83.
21. *Methodology for the prediction and assessment of radioactive contamination of air, soil, water bodies, as well as possible radiation doses in the event of radiation accidents at AES for various variants of meteorological conditions*. Moscow, Goskomgidromet, 1988, 100.
22. *Radiation Safety Standards of Ukraine (NRBU-97)*. Kyiv, 115 p. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0062282-97>.
23. Ivlev, L.S., Dovgalyuk, YU.A. (1999). *Physics of Atmospheric Aerosol Systems*. SPb, NIIKH SPbGU, 194.
24. Haryanto, U., Goenawan, R.D., Harsanti, D. *The development of hygroscopic cloud seeding flare in indonesia: evaluation and measurement of distribution particles*. Retrieved from http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/OBS.Haryanto_Indonesia_paper_1.pdf.
25. Kozlov, V.N., Klingo, V.V., Lihachev, A.V., Okunev, S.M., Scherbakov, A.P., Schukin, G.G. (2002). *The procedure for carrying out work on the artificial induction of precipitation from convective clouds in the fight against forest fires on board light-engine aircraft*. SPb, Gidrometeoizdat, 24.
26. *The main provisions of Energoatom preparedness and response system to NPP emergencies*. PL-D.0.03.089–15, Kyiv, 2015, 76.
27. UNSCEAR 2000. *Exposures and effects of the Chornobyl accident (Annex J)*. New York: United Nations. Retrieved from <http://www.unscear.org/docs/reports/annexj.pdf>.

Процедура реализации метода искусственного осаднения радиоактивных веществ из атмосферы

Кустов М. В.¹, Слепужников Е. Д.¹, Липовой В. А.¹,
Хмыров И. М.¹, Дадашов Ильгар Фирдовси оглы²,
Баскин О. М.³

¹Национальный университет гражданской защиты Украины, г. Харьков, Украина

²Академия МЧС Азербайджанской Республики, г. Баку, Азербайджан

³Университет Гринвича, Старый Королевский военно-морской колледж, Лондон, Соединенное Королевство Великобритании и Северной Ирландии

Проведенные исследования процессов ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций на объектах атомноэнергетического комплекса с выбросом газообразных и дисперсных радиоактивных веществ в атмосферу, позволили разработать процедуру практической реализации данного метода. Метод ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций направлен на осаднение из атмосферы опасных радиоактивных веществ, попадающих в атмосферу при техногенных авариях на атомных электростанциях и других объектах по хранению и переработке радиоактивных веществ. Разработанная процедура на предложенном алгоритме действий функционирует в рамках единой государственной системы гражданской защиты. Представленная процедура позволяет решить три основных задачи ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций — это мониторинг зоны поражения, принятие эффективного управленческого решения и непосредственное влияние на зону поражения от чрезвычайной ситуации. Основой принятия эффективного управленческого решения является прогнозирование динамики зон радиационного загрязнения, прогнозирования интенсивности осадков при различных способах искусственного осадкообразования и прогнозирование эффективности влияния осадков на динамику изменения зон загрязнения. С целью расширения возможностей существующих методик прогнозирования зон загрязнения, предложена их модификация с учетом особенностей выпадения осадков. Использование данной процедуры позволяет минимизировать масштабы крупных чрезвычайных ситуаций регионального и государственного уровней. За счет использования методов искусственного осадкообразования, как предусмотрено в процедуре, существует возможность осаднения опасных радиоактивных веществ из атмосферы с высоты нескольких километров, что невозможно реализовать другими известными методами. Разработанный алгоритм действий и процедура реализации метода ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций путем искусственного инициирования осадков, являются базой для разработки методики действий практических аварийно-спасательных подразделений при ликвидации чрезвычайных ситуаций регионального и государственного уровней.

Таким образом, есть основание утверждать, что использование предложенной процедуры позволит повысить эффективность ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций техногенного характера с выбросом в атмосферу опасных радиоактивных веществ.

Ключевые слова: чрезвычайные ситуации техногенного характера, выброс в атмосферу радиоактивных веществ, осаднение опасных веществ из атмосферы, алгоритм действий, процедура реализации метода.

Procedure for Implementation of the Method of Artificial Deposition of Radioactive Substances from the Atmosphere

Kustov M.¹, Slepuzhnikov E.¹, Lipovoy V.¹, Khmyrov I.¹,
Dadashov Ilgar Firdovsi², Buskin O.³

¹National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

²Academy of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan

³University of Greenwich, Old Royal Naval College, London, UK

Studies of the response to nuclear emergencies with the release of gaseous and dispersed radioactive substances into the atmosphere allowed us to develop a procedure for the practical implementation of this method. The emergency response method is aimed at depositing hazardous radioactive substances from the atmosphere that enter the atmosphere during man-made accidents at nuclear power plants and other facilities for the storage and processing of radioactive materials. The developed procedure with the proposed algorithm of actions operates within the framework of a unified state system of civil protection. The presented procedure allows solving three main tasks on the elimination of emergency consequences: monitoring of the affected area, taking effective management decisions and direct influence on the affected area. The basis for making effective management decisions is to predict the dynamics of radioactively contaminated areas, predict the intensity of precipitation with various methods of artificial deposition and predict the effectiveness of deposition effects on the dynamics of changes in contaminated areas. In order to expand the capabilities of available methods for predicting contaminated areas, their modification has been proposed taking into account deposition features. The use of this procedure allows minimizing the scale of major emergencies at regional and state levels. Due to the use of artificial deposition methods, as provided for in the procedure, there is the possibility of depositing dangerous radioactive substances from the atmosphere from a height of several kilometers, which cannot be implemented by other known methods. The developed algorithm of actions and the procedure for implementing the emergency response method by artificially initiated deposition are the basis for the development of a procedure for practical emergency rescue units during emergency response at regional and state levels. Thus, there is a reason to believe that the use of the proposed procedure will improve the efficiency of response to man-made emergency with the release of hazardous radioactive substances to the atmosphere.

Keywords: man-made emergency, release of radioactive substances into the atmosphere, deposition of hazardous substances from the atmosphere, algorithm of actions, method implementation procedure.

Отримано 20.03.2019