The Central Research institute
of the Armed Forces of Ukraine

ISSN (print): 2786-9318
ISSN (online): 2786-9326
Military Science. Vol. 4 No.1 (2026)

Received: *January 12, 2026* | **Revisions Requested:** - | **Revision Received:** -
Accepted: *March 2, 2026* | **Published Online:** *April 10, 2026*

Licensed (C) by Creative Commons Attribution International License 4.0 (CC BY-NC-SA)

DOI: 10.62524/msj.2026.4.1.20

Аналіз впливу хімічної та радіаційної дифузії на організм людини

Артем Карпусь
ад'юнкт
кафедра радіаційного, хімічного, біологічного захисту та цивільної безпеки
Інститут логістики та підтримки військ (сил)
Національний університет оборони України
03049, проспект Повітряних Сил, 28, Київ, Україна
e-mail: karpusark@gmail.com
ORCID: 0009-0003-2406-1924

Алі Кенгерлі
ад'юнкт
кафедра радіаційного, хімічного, біологічного захисту та цивільної безпеки
Інститут логістики та підтримки військ (сил)
Національний університет оборони України
03049, проспект Повітряних Сил, 28, Київ, Україна
e-mail: alikenherli@gmail.com
ORCID: 0009-0005-5794-6221

"Природа діє невидимими частинками".
(*Лукрецій)*

Анотація. Статтю присвячено комплексному дослідженню механізмів хімічної та радіаційної дифузії як ключових чинників ураження людини в умовах сучасних військових конфліктів і техногенних катастроф. Розкрито фізико-математичну сутність дифузійних процесів, що базуються на законах Фіка, й обґрунтовано трансформацію локальних джерел зараження в об'ємні зони контамінації. Метою публікації є детальне дослідження того, як хімічні сполуки та радіоактивні елементи поширюються у навколишньому середовищі та проникають в організм людини, стаючи критичними чинниками ураження під час сучасних військових конфліктів та аварій техногенного характеру. Автори зробили спробу пояснити, як за допомогою математичних законів Фіка визначити фізичну суть того, як невелика хмара газу або локальне місце вибуху перетворюється на масштабну зону зараження. У роботі ставиться завдання проаналізувати реальні приклади застосування іритантів та токсичних речовин, таких як хлор і аміак, що використовуються під час російської агресії проти України для дезорієнтації та витіснення військовослужбовців Збройних Сил України із укріплень. Важливою частиною мети є виявлення слабких місць у сучасному захисному спорядженні, зокрема дослідження того, як молекули отруйних речовин мають змогу проходити крізь фільтри або навіть саму гуму масок протигазів. Детально проаналізовано тактику застосування іритантів (CS, хлоропікрин) та сильнодіючих отруйних речовин (хлор, аміак), що використовуються для дезорієнтації та витіснення особового складу Збройних Сил України із фортифікованих позицій. Особливу увагу приділено фізіологічним аспектам, а саме:

ISSN (print): 2786-9318
ISSN (online): 2786-9326
Military Science. Vol. 4 No.1 (2026)

трансдермальному проникненню токсинів та хімічним опікам дихальних шляхів. Важливим практичним аспектом дослідження є аналіз критичних недоліків засобів індивідуального захисту, зокрема явища "дифузійного проскоку" крізь фільтри та проникності полімерних матеріалів масок для молекул отруйних речовин. Радіаційний блок дослідження зосереджується на процесах внутрішнього опромінення через інгаляційні та пероральні шляхи. Автор розкриває механізм селективної дифузії радіонуклідів, де ізотопи (Стронцій-90, Йод-131, Цезій-137) заміщують стабільні хімічні елементи в органах-мішенях, спричиняючи радіоліз клітинної води та пошкодження ДНК. Висвітлено як негайні прояви променевої хвороби, так і довгострокові стохастичні наслідки (онкогенез, мутації). Висновки роботи підкреслюють стратегічну значущість моніторингу дифузійних процесів для розроблення сучасних систем захисту. Стаття базується на актуальних даних щодо застосування хімічних сполук під час російської агресії проти України, що робить її критично важливою для фахівців з радіаційного, хімічного та біологічного захисту, військової медицини та цивільної безпеки.

Ключові слова: хімічна та радіаційна дифузія, радіаційне ураження, закони Фіка, іританти, сильнодіючі отруйні речовини.

Вступ (Introduction)

У сучасних геополітичних умовах питання захисту від впливу хімічних і радіаційних чинників набуває критичного значення для глобальної безпеки [7]. Світова спільнота стикається з викликами, де межа між випадковими промисловими аваріями та навмисним використанням небезпечних речовин стає дедалі тоншою [5, 12]. Процеси хімічної та радіаційної дифузії є фундаментальними фізико-хімічними явищами, що визначають динаміку формування зон ураження та тривалість контамінації об'єктів [1, 4].

Аналіз наукових джерел за останні роки свідчить про глибокий інтерес до механізмів поширення хімічних сполук. Дослідження організації із заборони хімічної зброї (ОЗХЗ) та праці провідних фахівців акцентують увагу на токсикологічних ефектах іритантів та промислових сполук, таких як хлор і аміак, підкреслюючи їхню здатність уражати глибокі відділи дихальної системи [12, 13]. Питання радіаційної безпеки та внутрішнього опромінення детально розглядаються в стандартах МАГАТЕ та роботах з моделювання радіаційно-індукованої сегрегації [8, 4]. Водночас, практичні звіти вказують на систематичне застосування спецзасобів типу К-51 та РГ-ВО в зоні бойових дій, що потребує негайного перегляду існуючих протоколів захисту [3]. У науковій літературі також порушується проблема ефективності сорбційних матеріалів та їхньої здатності протистояти дифузійному проникненню отруйних речовин у критичних умовах [9, 11].

Попри значну кількість фундаментальних досліджень, у більшості робіт розглянуто хімічну та радіаційну дифузію як ізольовані процеси. Наукова новизна цього дослідження полягає у комплексному підході до аналізу цих явищ як єдиного дифузійного детермінанта ураження організму людини [14]. Уперше в межах однієї роботи поєднується математичне обґрунтування за законами Фіка [1, 2] із аналізом уразливості полімерних матеріалів засобів індивідуального захисту до "дифузійного проскоку" [11]. На основі аналізу досвіду відсічі збройній агресії проти України у статті пропонується оновлена концепція оцінювання ризиків, що враховує селективну дифузію радіонуклідів та трансдермальний вплив сучасних бойових токсичних хімічних речовин (БТХР) [6, 15].

Матеріали та методи (Materials and Methods)

В основу роботи покладено комплексний аналіз процесів масоперенесення та іонізуючого випромінювання. Теоретичним підґрунтям для аналізу хімічної дифузії стали фундаментальні закони Фіка, що дозволяють кількісно описати рух молекул у газовому

ISSN (print): 2786-9318
ISSN (online): 2786-9326
Military Science. Vol. 4 No.1 (2026)

середовищі та біологічних тканинах [1]. Для оцінювання кінетики дифузійних процесів у багатокомпонентних системах використано методи термодинаміки, зокрема рівняння Даркена, що описує взаємозв'язок між коефіцієнтами дифузії та хімічним потенціалом компонентів [2].

У процесі підготовки статті було застосовано наступні методи:

математичне моделювання: використання диференціальних рівнянь у частинних похідних для опису поширення хмар отруйних речовин від локального джерела до формування об'ємної зони ураження [1, 4];

компаративний аналіз: зіставлення токсикологічних характеристик іритантів (CS, хлоропікрин) та сильнодіючих отруйних речовин (СДОР) (хлор, аміак) на основі даних ОЗХЗ та галузевих стандартів GHS [7, 12];

системний підхід: вивчення механізмів внутрішнього опромінення крізь призму селективної дифузії радіонуклідів, що базується на моделях радіаційно-індукованої сегрегації [4, 8].

Інформаційною базою роботи були:

нормативно-правові акти та методичні рекомендації МОЗ та ДСНС України щодо надання допомоги при хімічних та радіаційних ураженнях [6, 15];

наукові періодичні видання, що висвітлюють досвід медичного забезпечення військ та цивільного захисту в умовах збройної агресії [3, 13];

стандарти та звіти міжнародних організацій (МАГАТЕ, ВООЗ, ОЗХЗ), які визначають глобальні протоколи безпеки та класифікації небезпечних речовин [5, 8, 12];

технічна документація щодо характеристик фільтрувально-поглинальних систем та засобів індивідуального захисту органів дихання [11, 14].

Об'єктом дослідження є процеси дифузійного проникнення небезпечних агентів у навколишнє середовище та організм людини. Предметом дослідження є закономірності впливу цих процесів на біологічні структури та ефективність існуючих засобів захисту в умовах екстремальних концентрацій і радіаційного фону [9, 14].

Результати та обговорення (Results and Discussions)

Хімічна дифузія

Хімічна дифузія – це процес масоперенесення, зумовлений хаотичним тепловим рухом молекул, що призводить до вирівнювання концентрацій речовини в просторі.

Для військової діяльності дифузія є основним механізмом перетворення локального джерела хімічного зараження (наприклад, місця розриву снаряда) в об'ємну зону ураження, або подальше розповсюдження зараження шляхом контакту із чинником [4] (чи результатом) зараження, що утворює перехресне зараження.

Існує математична модель, що пояснює процес перемішування речовини із зони високої концентрації в зону низької концентрації та визначена першим законом Фіка [1]. Для опису поширення отруйних речовин застосовується перший закон Фіка, що має наступний вигляд:

$$J = -D\frac{dC}{dx}, \quad (1)$$

де: J – дифузійний потік (кількість речовин, що проходять через одиницю площі за одиницю часу), одиниця вимірювання моль/м^2*с;

D – коефіцієнт дифузії (характеризує швидкість проникнення речовини в конкретне середовище), одиниця вимірювання м^2/с;

c – концентрація речовини, одиниця вимірювання моль/м^2;

x – координата вздовж напрямку дифузії (м);

dC/dx – градієнт" концентрації (зміна концентрації на одиницю довжини).

"-" – вказує на те, що потік речовини спрямований протилежно до вектора градієнта

ISSN (print): 2786-9318
ISSN (online): 2786-9326
Military Science. Vol. 4 No.1 (2026)

концентрації. Тобто речовина рухається від більшої концентрації до меншої.

Для нестаціонарних процесів (коли концентрація змінюється не лише у просторі, а й із часом, що характерно для газового інциденту) використовується другий закон Фіка [1]. Цей закон пояснює, як швидко змінюється концентрація в конкретному місці, та має наступний математичний вигляд:

$$\frac{dc}{dt} = D\frac{d^2c}{dx^2}, \quad (2)$$

де: dc/dt – швидкість зміни концентрації в часі в певній точці (просторі);
dc – нескінченно мала;
dt – нескінченно малий проміжок часу;
D – коефіцієнт дифузії;
d^2c/dx^2 – друга похідна концентрації за координатою.

Другий закон Фіка дозволяє розрахувати час [3], через який небезпечна концентрація небезпечних хімічних речовин (НХР) / СДОР / БТХР досягне позицій військовослужбовців на певній відстані від епіцентру джерела забруднення (місця вибуху).

Застосування нелетальної хімічної зброї

Застосування нелетальної хімічної зброї (іритантів) та СДОР у військових конфліктах набуває поширення, попри систематичні спроби міжнародної спільноти заборонити це. Одним із документів, що регламентує заборону використання СДОР, є “Конвенція про заборону хімічної зброї (КЗХЗ)” [9].

СДОР – це промислові хімічні речовини (хлор, аміак та інші), які виробляються у величезних кількостях для мирних цілей, але можуть бути зброєю у разі навмисного витоку, обстрілу підприємств або терористичних інцидентів.

До іритантів (НХР) належать такі гази, як CS або хлоропікрин. Зазначені іританти дозволені для поліцейських операцій (розгін натовпу). КЗХЗ суворо заборонено використовувати іританти як засіб ведення війни [9].

Використання СДОР та НХР у бою або на етапах підготовки до нього дуже часто є засобом деморалізації та демонстрації переваги. Також їх можуть використовувати для “попередження” до використання більш небезпечної зброї. Головна небезпека іритантів / СДОР у замкненому просторі (бліндажі) полягає в тому, що вони викликають паніку [6] та неможливість чинити опір, що призводить до швидкої загибелі підрозділу від звичайної зброї (табл. 1).

Таблиця 1. Симптоми негативної дії СДОР / НХР на організм людини

Речовина	Тип дії	Шлях дифузії	Основні симптоми	Стан у міжнародному праві
CS / Хлоропі-крин	Сльозогінний (іритант)	Слизові оболонки, пори шкіри	Різь в очах, кашель, нудота	Заборонено в бою
Хлор Cl_2	Задушливий (СДОР)	Альвеолярні мембрани легень	Опік дихальних шляхів, набряк легень	Повна заборона як зброї
Аміак NH_3	Подразнювальний / задушливий	Глибока тканинна дифузія	Опіки слизової, зупинка дихання	Повна заборона як зброї

Процес дифузії для СДОР та іритантів

Явище дифузії у контексті СДОР та іритантів (CN, CS) є ключовим фактором, що визначає ефективність хімічної атаки [2] або інциденту / теракту. У військовій справі дифузія – це не просто фізичне змішування, а процес “доставлення” отруйних речовин безпосередньо в тканини організму крізь захисні бар’єри [3].

The Central Research institute
of the Armed Forces of Ukraine

ISSN (print): 2786-9318
ISSN (online): 2786-9326
Military Science. Vol. 4 No.1 (2026)

Механізми дифузії іритантів (CN та CS).

Речовини CN (хлорацетофенон) та CS (динітрил о-хлорбензильмалонової кислоти) зззвичай використовуються у вигляді аерозолів. Більшість військовослужбовців сприймає ці аерозолі як "гази" [2], але насправді це дрібнодисперсні тверді частки, які дифундують у вологому середовищі.

Дифузія в слизові оболонки людини. Молекули CS надзвичайно гігроскопічні. Потрапляючи на очі або в носоглотку, вони миттєво дифундують у слізну рідину [6] та слиз, що викликає лавиноподібне подразнення нервових закінчень (рис. 1).

Дифузія крізь одяг / спорядження виникає через те, що молекули іритантів мають малий розмір, це дозволяє їм дифундувати крізь пори звичайної бавовняної форми [10].

Під час війни у В'єтнамі американський підрозділ "тунельні щури" використовував CS для викурювання партизанів. Через дифузію аерозолю в замкненому просторі та його затримку в тканинах одягу [6] солдати часто отримували вторинні (перехресні) опіки шкіри (особливо в місцях потовиділення), оскільки піт (завдяки своїм фізико-хімічним властивостям) прискорював дифузію молекул CS усередину епідермісу.

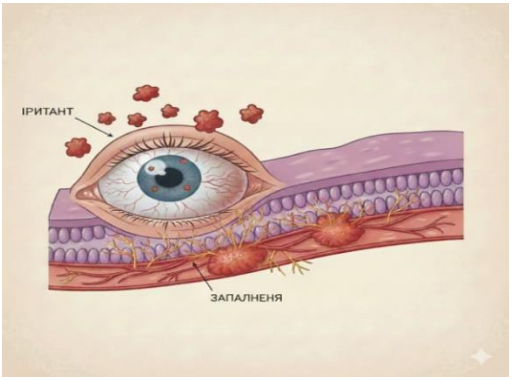


Рисунок 1. Дія іритантів у слизовій оболонці людини

СДОР у ході ведення бойових дій

До СДОР належать хлор, аміак, азотна кислота – речовини, які часто стають інструментом "хімічного тероризму" [10], який важко довести у міжнародній правовій базі. З огляду на те, що Україна – аграрна країна з розгалуженим сільськогосподарським сектором, запаси аміако- та хлоровмісних сполук вражають своїми масштабами.

Хлор (Cl_2). У разі терористичного акту в замкненому просторі хлор швидко витісняє кисень. Його дифузія крізь мембрани альвеол призводить до утворення соляної кислоти безпосередньо в тканинах. В Іраку (у 2006–2007 рр.) військовослужбовці зазнавали уражень навіть у бронетехніці, оскільки хлор дифундував крізь системи вентиляції без спеціальних фільтрів [6].

Аміак (NH_3). На відміну від кислот, аміак дифундує вглиб тканин, розчиняючи білки (коліквaційний некроз). На сході України військовослужбовці сил оборони України мали випадки, коли аміак миттєво дифундував у слизову очей, викликаючи повну сліпоту за секунди (табл. 2).

Небезпека у застосуванні СДОР проти особового складу полягає в тому, що загальна кількість СДОР сягає цифри більше 6000 сполук. Зважаючи на те, що в ході бойових дій особовий склад підрозділів виконує завдання на території очисних споруд, підприємств легкої та важкої промисловості, які "насичені" СДОР через специфіку виробничих процесів та цільового призначення, він наражається на небезпеку ураження саме СДОР. Для захисту від СДОР потрібні спеціальні фільтрувально-поглинальні елементи (ФПК), які стримуватимуть

ISSN (print): 2786-9318
ISSN (online): 2786-9326
Military Science. Vol. 4 No.1 (2026)

певний СДОР. Саме через відсутність індикаторних засобів та фільтрувальних елементів від певних СДОР з'являються ризики ураження особового складу.

Таблиця 2. Наслідки дифузійного впливу на організм людини

Речовина	Тип дифузії	Основний ефект	Уразливість військових
CN (Хлораце-тофенон)	Швидка дифузія в рогівку	Сльозотеча, печіння	Втрата візуального контакту, обмежена дієздатність
CS (Газ "Терен")	Дифузія в дихальні шляхи	Паніка, кашель, спазм	Неможливість віддавати команди, деморалізуючий фактор
Хлор / аміак	Глибока тканинна дифузія	Набряк легень, опіки	Тимчасова недієздатність, залучення додаткових сил та засобів для евакуації або смерть
VX / "Зарин"	Трансдермальна дифузія	Параліч нервової системи, перелам кісток у результаті судомних скорочень	Потреба у повній ізоляції тіла, перехресне зараження, поточна паніка, деморалізація особового складу

Наступим ризиком є процес накопичення у ФПК та процес "дифузійного проскоку". Під час інтенсивного використання фільтрувальних елементів виникає явище "дифузійного проскоку", а саме:

насичення (забивання) фільтра: якщо концентрація СДОР дуже висока, молекули дифундують крізь шари сорбенту швидше, ніж він встигає їх зв'язати [5]. У цьому випадку негативним явищем є погодні умови (волога), яка "зв'язує" сорбент, створивши міжпрошаркові щілини, крізь які проникає СДОР [6];

дифузія крізь гуму: молекули (БТХР) іприту або VX-газів можуть дифундувати безпосередньо крізь гумову маску протигаза, особливо в старих зразках (ГП-5, ПМГ, ПМК, ПФЛ, ПБФ та ін.), де гума втратила щільність [7];

"дифузійний проскок" є найбільшою небезпекою для екіпажів, що діють всередині техніки: якщо концентрація СДОР біля машини занадто висока, то молекули газу дифундують крізь фільтри вентиляції швидше, ніж сорбент встигає їх поглинути. Також старі гумові ущільнювачі та шолом-маски протигазів можуть пропускати гази через втрату гумою щільності (дифузія крізь пори) [8] (рис. 2).

Сучасна російська агресія супроводжується систематичним використанням хімічних речовин як інструменту "тихого" терору.

На рис. 3 наведено приклад появи "проскоку" за звичайних умов (штрих-пунктир) та умов підвищеної вологи (зелена крива) за однаковою концентрацією (пряма лінія).

Історичні факти застосування СДОР та іритантів

У часи Першої світової війни під час битви при Іпрі (1915 р.) Німеччина використала рідкий хлор із балонів. Хлор важчий за повітря, тому він заповнював траншеї, викликаючи хімічні опіки легень та задуху.

Зафіксовано випадки застосування під час війни у В'єтнамі, коли армія США масово використовувала газ CS для "викурювання" бійців В'єтконгу з підземних тунелів. Це дозволяло або вигнати противника на поверхню під вогонь артилерії, або тимчасово вивести його з ладу в замкненому просторі.

У Сирії (у 2014–2018 рр.) під час облоги міст (Дума або Хан-Шейхун) неодноразово фіксувалися скидання бочок із хлором. Оскільки хлор є промисловим товаром, його використання легше "замаскувати" під промислову аварію, ніж використання нервово-паралітичних речовин на кшталт "Зарину", що в подальшому буде доведено, а винуватців притягнуть до відповідальності.

The Central Research institute
of the Armed Forces of Ukraine

ISSN (print): 2786-9318
ISSN (online): 2786-9326
Military Science. Vol. 4 No.1 (2026)

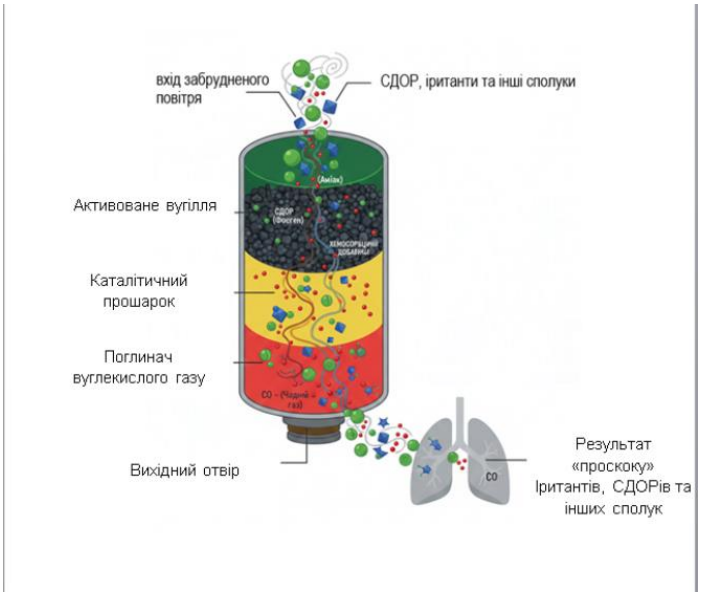


Рисунок 2. Результат “дифузійного проскоку” крізь фільтрувально-поглинальний елемент

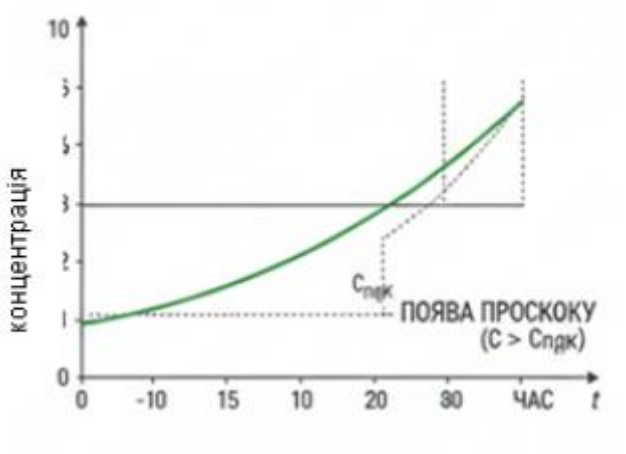


Рисунок 3. Результат “дифузійного проскоку” у графічному вигляді

У ході російсько-української війни росія використовує тактику “гібридного” застосування СДОР та іритантів, намагаючись маскувати воєнні злочини під промислові аварії або поліцейські заходи, щоб уникнути посилення міжнародних санкцій, які впливають на економічну стабільність країни. росія не цурається використовувати промислові / техногенні інциденти як метод війни. Під час боїв за промислові зони (наприклад, Сєвєродонецький “Азот”) обстріли складів з аміаком або азотною кислотою створювали зони смертельного зараження, що фактично працювало як хімічна зброя. У районі населеного пункту Рубіжне російські війська цілеспрямовано обстрілювали цистерни з азотною кислотою (HNO_3) та аміаком (NH_3) [6]. Це також створило зони смертельної контамінації, які фактично виконували роль хімічної зброї в населеному пункті та на рубежах оборони Збройних Сил України (ЗС України), але подавалося російською пропагандою як випадкові влучання та “наслідки бойових дій”.

Унаслідок обстрілу підприємства “Сумихімпром” (березень 2022 р.) було пошкоджено

ISSN (print): 2786-9318
ISSN (online): 2786-9326
Military Science. Vol. 4 No.1 (2026)

резервуар з аміаком. Хмара поширилася на кілька кілометрів, що змусило жителів населеного пункту Новоселиці терміново вживати заходів захисту та евакуюватися. Це, своєю чергою, призвело до створення несприятливих умов оборони для ЗС України та спричинило додатковий психологічний тиск на населення.

Підрозділи рф неодноразово пошкоджували аміакопровід "Тольятті-Одеса" – трубопровід у Харківській та Донецькій областях (жовтень 2025 року, населений пункт Дружківка). Це призводило до необхідності використання засобів захисту та обмеження у веденні бойових дій через швидку насиченість фільтрувальних елементів та перехресне зараження через епітелій та піт військовослужбовців.

У серпні 2024 року на Тернопільщині після нічної атаки на промисловий об'єкт виникла пожежа, що спричинила викид хлору та соляної кислоти в повітря мирного міста. Гранично-допустиму концентрацію було перевищено у 4–10 разів.

Під час штурму Маріуполя (2022 р.) підрозділи рф використовували CS. Застосування CS в умовах обмеженої вентиляції створювало концентрацію, що призводила до швидкого насичення вугільних фільтрів протигазів особового складу та до його подальшого ураження.

Більшого поширення набуває застосування скидів НХР із дронів. Станом на листопад 2025 року офіційно зафіксовано понад 9 000 випадків застосування хімічних речовин, переважно шляхом скидання гранат К-51 та РГ-ВО із БпЛА [6]. Ці гранати містять речовину CS та хлоропікрин, що суворо заборонено КЗХЗ як засіб ведення війни [9]. Наступне, чого намагаються досягти росіяни, – психологічний тиск на особовий склад ЗС України та його дезорієнтація. Метою таких атак є не лише фізичне ураження, а й витіснення бійців ЗС України з фортифікаційних споруд під вогонь артилерії [6].

Радіаційна дифузія

Радіаційна дифузія в організмі людини стосується процесів кінетики радіонуклідів – їх надходження, переміщення (транспортування) та перерозподілу між тканинами, рідкими середовищами в організмі людини та її органами [2]. Цей процес регулюється законами дифузії, осмосу та активного біологічного транспорту. На відміну від зовнішнього опромінення [2], внутрішня дифузія ізотопів створює пролонговане радіаційне навантаження на критичні органи.

Радіонукліди потрапляють до внутрішнього середовища організму людини трьома основними шляхами, а саме:

1. Інгаляційний шлях. Газоподібні сполуки та аерозолі дифундують через альвеолярно-капілярну мембрану. Швидкість дифузії залежить від дисперсності часток. Частки розміром $d < 0.5$ мкм проникають безпосередньо в кров, оминаючи захисні бар'єри верхніх дихальних шляхів.

2. Пероральний шлях. Найбільш масовий шлях у постійних умовах забруднення. Дифузія відбувається через слизову оболонку шлунково-кишкового тракту (ШКТ). Інтенсивність залежить від хімічної валентності елемента та його розчинності.

3. Перкутанний шлях. Дифузія через непошкоджену шкіру є обмеженою, проте для тритію (^{3}H) та деяких органічних сполук вона є значущим фактором ризику [1], що має суттєвий вплив на організм людини.

Після потрапляння в системний кровотік починається етап селективної дифузії [2]. Організм людини часто не розрізняє радіоактивні ізотопи [1] та їхні стабільні хімічні аналоги, через що відбувається помилкове вбудовування радіонуклідів у метаболічні цикли, а саме:

Остеотропна група. Такі елементи, як Стронцій-90 (^{90}Sr) та Радій-226 (^{226}Ra) дифундують у кісткову тканину, заміщуючи Кальцій. Це призводить до опромінення гемопоетичної (кровотворної) системи.

Тиреотропна група. Ізотопи Йоду (^{131}I) концентруються у щитоподібній залозі за допомогою активного транспорту, де рівень концентрації може у тисячі разів перевищувати

ISSN (print): 2786-9318
ISSN (online): 2786-9326
Military Science. Vol. 4 No.1 (2026)

рівень у крові [12].

Гепатотропна та рівномірна дифузія

Цезій-137 (^{137}Cs), виступаючи аналогом Калію, дифундує рівномірно по м'яких тканинах (м'язи, печінка) [2], створюючи загальний гамма-фон усередині тіла.

Дифузія радіонуклідів усередину клітини призводить до іонізації її структур. У науці виділяють два ключових механізми деструкції – пряма дія випромінювання та непряма дія з радіолізом води.

Дія опромінення поділяється на пряму та непряму [13].

Пряма дія випромінювання – це процес, коли іонізуюча частинка безпосередньо взаємодіє з макромолекулами. Найкритичнішим є пошкодження ДНК:

одинарні та подвійні розриви ланцюгів;

виникнення зшивок "білок-ДНК" [2];

порушення генетичного коду, що веде до мутагенезу або апоптозу клітини.

Непрямою дією та радіолізом води є те, що клітина складається з води на 70–80%, основна енергія випромінювання поглинається нею. Процес радіолізу описується рівнянням (3):

$$H_2O \xrightarrow{\alpha,\beta,\gamma} H_2O^+ + e^- \rightarrow \cdot OH + H\cdot \quad (3)$$

Утворення вільних радикалів (зокрема гідроксильного радикалу ·OH) запускає ланцюгові реакції перекисного окиснення ліпідів, що руйнує клітинні мембрани [2].

Соматичні та стохастичні наслідки радіаційної дифузії для організму

Наслідки дифузійного накопичення радіації поділяються на детерміновані та стохастичні (імовірності) ефекти.

Детерміновані ефекти виникають у разі перевищення певного порогу дози (променева хвороба, променеві опіки, стерильність). Характеризуються прямою залежністю важкості стану від отриманої дози.

Стохастичні (імовірнісні) ефекти не мають порогу. Навіть одинична дифузія ізотопу в ДНК-структуру може призвести до раку або генетичних відхилень у майбутніх поколінь. До них належать лейкози, солідні пухлини та спадкові хвороби.

Безпосередній ризик подальших наслідків радіаційної дифузії залежить від впливу на організм людини отриманої еквівалентної дози (вимірюється в Зівертах, Зв):

малі дози (до 0,1 Зв): прямих симптомів немає, але зростає ризик онкологічних захворювань та генетичних мутацій, які можуть проявитися через десятиліття або у нащадків;

середні дози (1–2 Зв): розвивається легка форма гострої променевої хвороби (нудота, слабкість, зміна складу крові);

високі дози (понад 6 Зв): тяжка форма променевої хвороби, що без термінової допомоги зазвичай призводить до смерті через руйнування кісткового мозку та ШКТ.

Історичні приклади радіаційної дифузії

Чорнобильська катастрофа стала головним джерелом даних про **біологічну тропність** (вибірковість) радіонуклідів (дифузія Йоду-131 та Цезію-137) [13].

Йод-131 та щитоподібна залоза. У перші тижні після аварії основним чинником ураження був ^{131}I. Через вживання забрудненого молока радіоактивний йод потрапляв у ШКТ, звідки дифундував у кров і вибірково накопичувався в щитоподібній залозі. Це призвело до різкого зростання випадків раку щитоподібної залози серед дітей (понад 6000 випадків за наступні 20 років), оскільки дитячий орган має інтенсивніший метаболізм.

Цезій-137 та м'язові тканини. ^{137}Cs став довгостроковим фактором. Як аналог Калію він дифундує по всьому тілу, але найбільше концентрується в м'язах. Дослідження дітей у Гомельській області (Білорусь) у 1990-х роках виявили пряму залежність між рівнем накопиченого Цезію в м'яких тканинах і частотою патологій серцево-судинної системи та нирок.

The Central Research institute
of the Armed Forces of Ukraine

ISSN (print): 2786-9318
ISSN (online): 2786-9326
Military Science. Vol. 4 No.1 (2026)

Аварія на АЕС “Фукусіма-1” (2011 р.). Морська дифузія та харчові ланцюги. Японська аварія продемонструвала шлях дифузії через морські екосистеми [11].

Величезну кількість радіоактивної води було скинуто в океан. Радіонукліди дифундували у тканини морських організмів (риба, молюски). Хоча японська влада запровадила суворий контроль, випадки виявлення ^{134}Cs та ^{137}Cs у рибі поблизу узбережжя підтвердили механізм передачі радіації людині через трофічні ланцюги.

На відміну від Чорнобиля, де був тепловий вибух [12], у “Фукусімі” відбулися вибухи водню [11]. Це призвело до утворення дрібнодисперсних аерозолів, які при вдиханні дифундували через легені безпосередньо в кровотік ліквідаторів.

Прямий контакт та внутрішня дифузія, що сталися під час інциденту в Гоянії, Бразилія (1987 р.). Ця подія пов’язана з крадіжкою джерела Цезію-137 із залишеної лікарні. Порошок хлориду цезію мав яскраво-блакитне світіння, що привабило людей. Вони торкалися його руками та випадково споживали з їжею. У постраждалих спостерігалася швидка дифузія цезію в усі органи. Лікарі використовували берлінську лазурит (фероціанід заліза) – препарат, який “перехоплює” Цезій під час його дифузії в кишковик, запобігаючи повторному всмоктуванню в кров. Це врятувало життя багатьом пацієнтам, прискоривши виведення радіації.

Випробування ядерної зброї (1950–60-ті рр.) спричинили глобальну дифузію Стронцію-90 на полігонах та в місцях проведення цих випробувань [11]. Під час атмосферних ядерних випробувань Стронцій-90 розповсюджувався глобально. “Кістковий шукач”: ^{90}Sr хімічно подібний до Кальцію. Він дифундує в кісткову матрицю, де залишається на десятиліття (період напіврозпаду – 29 років). Масові дослідження молочних зубів дітей у США у 1950-х роках (“Baby Tooth Survey”) показали значне зростання вмісту Стронцію, що стало одним із вагомих аргументів для заборони ядерних випробувань в атмосфері (табл. 3).

Таблиця 3. Приклади радіаційної дифузії на історичних подіях

Подія	Ключовий радіоактивний елемент	Орган, що уражено у більшості	Основний шлях потрапляння в організм
Чорнобиль	Йод-131	Щитоподібна залоза	Харчовий
Фукусіма	Цезій-137	М’язи, серце	Вода, морепродукти
Гоянія	Цезій-137 (порошок)	Весь організм	Контактний / Пероральний
Ядерні тести	Стронцій-90	Кістки, зуби	Опади →трава, кущі, дерева→тварини→їжа (як наслідок усього ланцюга)

Висновок (Conclusion)

Аналіз процесів хімічної та радіаційної дифузії у військових конфліктах та техногенних інцидентів демонструє, що дифузія є не просто фізичним явищем змішування речовин, а критичним чинником доставлення токсичних та радіоактивних агентів безпосередньо в тканини організму крізь захисні бар’єри. Хімічна дифузія, що описується законами Фіка, забезпечує перетворення локального джерела зараження в об’ємну зону ураження, де іританти (CS, хлоропікрин) та СДОР (хлор, аміак) спричиняють швидку дезорієнтацію, паніку та незворотні ураження дихальної системи й слизових оболонок. Особливу небезпеку становить явище “дифузійного проскоку”, коли через високу концентрацію речовин або підвищену вологість сучасні засоби захисту (ФПК) [15] втрачають ефективність, а застарілі гумові маски стають проникними для молекул отрути.

Водночас, радіаційна дифузія створює пролонговане внутрішнє навантаження на організм через механізм селективної дифузії. Організм помилково вбудовує радіонукліди у метаболічні цикли, заміщуючи життєво важливі елементи, такі як Стронцій-90, що накопичується в кістках як аналог Кальцію. Йод-131 концентрується в щитоподібній залозі, а

ISSN (print): 2786-9318
ISSN (online): 2786-9326
Military Science. Vol. 4 No.1 (2026)

Цезій-137 рівномірно дифундує по м'яких тканинах [14], створюючи постійний внутрішній гамма-фон. На клітинному рівні цей процес супроводжується радіолізом води та утворенням вільних радикалів, що руйнує ДНК і призводить як до негайних детермінованих ефектів (променева хвороба), так і до віддалених стохастичних наслідків, таких як рак або генетичні мутації.

У сучасних умовах агресії використання СДОР і радіоактивних ізотопів перетворюється на інструмент "гібридного" тиску та тероризму, де цілеспрямовані обстріли хімічних підприємств або використання іритантів маскуються під промислові аварії чи поліцейські заходи. Це створює зони смертельної контамінації для комбатантів та некомбатантів, які мають на меті не лише фізичне знищення особового складу, а й глибоку деморалізацію та психологічний тиск на населення. Це потребує впровадження високоточних засобів моніторингу та сучасних стандартів індивідуального захисту учасників збройного конфлікту на всіх рівнях [15].

Рекомендації (Recommendations)

Дослідження становить значну цінність для широкого кола фахівців, діяльність яких пов'язана з безпекою, медициною та стратегічним плануванням у сфері РХБ / ХБР захисту. Першочергово матеріал є критично важливим для офіцерів та експертів служб РХБ / ХБР захисту, оскільки наукове обґрунтування явища "дифузійного проскоку" та математичне моделювання зон ураження за законами Фіка дозволяють переглянути терміни експлуатації фільтрувально-поглинальних елементів, систем і тактику розгортання сил у зонах контамінації.

Для військових і тактичних медиків стаття слугує змістовним посібником з ідентифікації симптомів ураження іритантами та СДОР, такими як хлор чи аміак, а також розкриває механізм селективної дифузії радіонуклідів, що є ключовим для призначення специфічної антидотної терапії та проведення йодної профілактики. Одночасно із цим, викладена інформація є цінною для фахівців ДСНС та цивільного захисту, адже може допомогти вдосконалювати протоколи евакуації населення та заходи з дезактивації територій з урахуванням глибини проникнення хімічних сполук у матеріали.

Наукова новизна щодо проникності полімерів та гуми під дією хімічних сполук створює надійну базу для розробників засобів індивідуального захисту, стимулюючи перехід до нових композитних матеріалів. Крім того, теоретичні викладки та аналіз реального бойового досвіду застосування хімічних речовин у сучасних конфліктах роблять цей матеріал незамінним для викладачів і курсантів військових ВНЗ, а також для командирів підрозділів, надаючи їм аргументовану базу для ухвалення рішень щодо захисту особового складу та вибору надійного екіпірування в умовах екстремальних концентрацій отруйних речовин.

Конфлікт інтересів (Conflict of Interest)

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів за тематикою статті.

Використані джерела

1. Фік, А. (1855). Дифузія. *Annalen der Physik,170* (1), 59–86.
2. Даркен, Л. С. (1948). Дифузія, рухливість та їх зв'язок із вільною енергією утворення вакансій. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 175*, 184–201.
3. Ельзенбаумер, Р., Фат, Б., & Єгер, Б. (н. д.). *Інтерметалічні сполуки в електронній упаковці*.
4. ASM International. (н. д.). Аналіз руйнувань та запобігання. У *Довідник ASM* (Т. 11). ASM International.
5. Каллістер, В. Д., мол., & Ретвіш, Д. Г. (2018). *Матеріалознавство та інженерія: Вступ*

ISSN (print): 2786-9318
ISSN (online): 2786-9326
Military Science. Vol. 4 No.1 (2026)

(10-те вид.). John Wiley & Sons.
6. Центр національного спротиву. (2024). *Звіти щодо застосування російськими окупаційними військами гранат К-51 та РГ-ВО на лінії бойового зіткнення*. Міністерство оборони України.
7. Настар, М., & Суассон, Ф. (2012). Моделювання радіаційно-індукованої сегрегації. *Comprehensive Nuclear Materials, 1*, 447–485.
8. Даркен, Л. С. (1948). Дифузія, рухливість та їх зв'язок між собою. *Transactions of the AIME, 175*, 184–201.
9. Всесвітня організація охорони здоров'я. (2020). *Заходи громадської охорони здоров'я у відповідь на загрозу застосування хімічної або біологічної зброї* (2-ге вид.). ВООЗ.
10. Міністерство охорони здоров'я України. (2022). *Надання медичної допомоги постраждалим внаслідок дії хімічних агентів у ході ведення бойових дій: Методичні рекомендації*. МОЗ.
11. Організація із заборони хімічної зброї (ОЗХЗ). (2023). *Довідник щодо властивостей іритантів та токсичних промислових хімікатів (Хлор, Аміак)*. OPCW Technical Secretariat.
12. Копилова, С. О., & Ткаченко, І. М. (2023). *Вплив хімічних чинників на дихальну систему військовослужбовців в умовах сучасної війни*. Журнал військової медицини України, *4* (2), 56–64.
13. Шматков, П. Д. (2021). *Військова токсикологія, радіологія та медичний захист: Підручник*. Військово-медична академія України.
14. Організація Об'єднаних Націй. (2023). *Узгоджена на глобальному рівні система класифікації та маркування хімічних речовин (GHS)*. (10-те перегл. вид.). ООН.
15. Міжнародне агентство з атомної енергії (МАГАТЕ). (2018). *Захист населення у разі ядерної або радіологічної аварійної ситуації*. (Серія норм безпеки № GSG-11). IAEA.
16. Трахтенберг, І. С., & Коршун, М. М. (2021). *Гігієна праці та виробнича санітарія: Навчальний посібник для ВНЗ*. Медицина. (Розділ про токсикологію СДОР та методи сорбційного захисту).
17. Коттон, Ф. А., & Вілкінсон, Дж. (2015). *Сучасна неорганічна хімія*. Wiley-Interscience. (Механізми взаємодії галогенів та аміаку з біологічними структурами).
18. Державна служба України з надзвичайних ситуацій (ДСНС). (2022). *Методичні рекомендації щодо організації радіаційного та хімічного спостереження в умовах воєнного стану*. ДСНС України.

References

1. Fick, A. (1855). On liquid diffusion. *Annalen der Physik, 170*(1), 59–86.
2. Darken, L. S. (1948). Diffusion, mobility and their interrelation through free energy in binary metallic systems. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 175*, 184–201.
3. Elsenbaumer, R., Fath, B., & Jäger, B. (n.d.). *Intermetallic compounds in electronic packaging*.
4. ASM International. (n.d.). Failure analysis and prevention. In *ASM Handbook* (Vol. 11). ASM International.
5. Callister, W. D., Jr., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials science and engineering: An introduction* (10th ed.). John Wiley & Sons.
6. National Resistance Center. (2024). *Reports on the use of K-51 and RG-VO grenades by Russian occupation forces on the line of active combat*. Ministry of Defense of Ukraine.
7. Nastar, M., & Soisson, F. (2012). Radiation-induced segregation modeling. *Comprehensive Nuclear Materials, 1*, 447–485.
8. Darken, L. S. (1948). Diffusion, mobility and their interrelation. *Transactions of the AIME, 175*, 184–201.

ISSN (print): 2786-9318
ISSN (online): 2786-9326
Military Science. Vol. 4 No.1 (2026)

9. World Health Organization (WHO). (2020). *Public health response to biological and chemical weapons: WHO guidance* (2nd ed.). WHO.
10. Ministry of Health of Ukraine. (2022). *Provision of medical care to victims of chemical agents during combat operations: Methodological recommendations*. MOH.
11. Organisation for the Prohibition of Chemical Weapons (OPCW). (2023). *Handbook on the properties of irritants and toxic industrial chemicals (Chlorine, Ammonia)*. OPCW Technical Secretariat.
12. Kopylova, S. O., & Tkachenko, I. M. (2023). Impact of chemical factors on the respiratory system of military personnel in modern warfare. *Journal of Military Medicine of Ukraine, 4*(2), 56–64.
13. Shmatkov, P. D. (2021). *Military toxicology, radiology, and medical protection: Textbook*. Ukrainian Military Medical Academy.
14. United Nations. (2023). *Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS)* (10th revised ed.). UN.
15. International Atomic Energy Agency (IAEA). (2018). *Arrangements for the protection of the public in a nuclear or radiological emergency* (Safety Standards Series No. GSG-11). IAEA.
16. Trachtenberg, I. S., & Korshun, M. M. (2021). *Occupational hygiene and industrial sanitation: Textbook for higher education institutions (Section on toxicology of hazardous substances and sorption protection methods)*. Medytsyna.
17. Cotton, F. A., & Wilkinson, G. (2015). *Advanced inorganic chemistry*. Wiley-Interscience. (Mechanisms of interaction of halogens and ammonia with biological structures).
18. State Emergency Service of Ukraine (SESU). (2022). *Methodological recommendations for the organization of radiation and chemical observation under martial law*. SESU Ukraine.

Analysis of the impact of chemical and radiation diffusion on the human body

Artem Karpus
Adjunct
Department of Radiological, Chemical, Biological Defense
and Civil Safety Institute of Force Support and Information Technologies
National Defense University of Ukraine
03049, Povitrianykh Syl Ave, 28, Kyiv, Ukraine
e-mail: karpusark@gmail.com
ORCID: 0009-0003-2406-1924

Ali Kenherli
Adjunct
Department of Radiological, Chemical, Biological Defense
and Civil Safety Institute of Force Support and Information Technologies
National Defense University of Ukraine
03049, Povitrianykh Syl Ave, 28, Kyiv, Ukraine
e-mail: alikenherli@gmail.com
ORCID: 0009-0005-5794-6221

“Nature works by unseen bodies”
(Lucretius)

The Central Research institute
of the Armed Forces of Ukraine

ISSN (print): 2786-9318
ISSN (online): 2786-9326
Military Science. Vol. 4 No.1 (2026)

Abstract. This scientific article is devoted to a comprehensive study of the mechanisms of chemical and radiation diffusion as key factors in human injury during modern military conflicts and man-made disasters. The article reveals the physical and mathematical essence of diffusion processes based on Fick's laws, justifying the transformation of local sources of infection into volumetric contamination zones. The aim of this article is a detailed study of how chemical compounds and radioactive elements spread in the environment and penetrate the human body, becoming critical factors of injury during modern military conflicts and industrial accidents. The paper seeks to explain how Fick's mathematical laws can define the physical essence of how a small gas cloud or a local explosion site transforms into a large-scale contamination zone. The task is to analyze real-world examples of the use of irritants and toxic substances, such as chlorine and ammonia, which are used during the russian aggression against Ukraine to disorient and displace servicemen of the Armed Forces of Ukraine from the fortifications. A vital part of this objective is identifying vulnerabilities in modern protective equipment, specifically investigating how toxic molecules can pass through filters or even the rubber of gas masks. The article provides a detailed analysis of the tactics of using irritants (CS, chloropicrin) and TIMs (chlorine, ammonia) used to disorient and displace personnel of the Armed Forces of Ukraine from fortified positions. Particular attention is paid to physiological aspects, namely: transdermal penetration of toxins and chemical burns of the respiratory tract. A significant practical aspect of the study is the analysis of critical flaws in personal protective equipment (PPE), specifically the phenomenon of "diffusion breakthrough" through filters and the permeability of mask polymer materials to toxic molecules. The radiation block of the study focuses on internal exposure processes via inhalation and oral pathways. The author reveals the mechanism of selective diffusion of radionuclides, where isotopes (Strontium-90, Iodine-131, Cesium-137) substitute stable chemical elements in target organs, causing radiolysis of cellular water and DNA damage. Both immediate manifestations of radiation sickness and long-term stochastic consequences (oncogenesis, mutations) are highlighted. The findings of the work emphasize the strategic importance of monitoring diffusion processes for the development of modern protection systems. The article is based on current data regarding the use of chemical compounds during the Russian aggression against Ukraine, making it critically important for specialists in CBRN (NBC) specialization, military medicine, and civil security.

Keywords: chemical and radiation diffusion, radiation injury, Fick's laws, irritants, toxic industrial materials/chemicals (TIMs/TICs).