

263 ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

УДК 628.5

doi: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321366

© Мітіна Н.Б.¹, Плис М.М.², Когтєва О.П.³, Герасименко В.О.⁴,
Мініна Ю.О.⁵

ОБҐРУНТУВАННЯ ВПЛИВУ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ТА ТОПОГРАФІЧНИХ УМОВ НА РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ХМАРИ ЗАБРУДНЕНОГО ПОВІТРЯ

Мета. Обґрунтування суттєвого впливу метеорологічних умов та характеру місцевості (топографічні умови) на характер поведінки небезпечно хімічних речовин (НХР) в атмосфері (навколишньому середовищі) при аварії на хімічно-небезпечному об'єкті (ХНО) з її виливом (викидом) з урахуванням того, що ці умови можуть змінюватися у просторі і часі. Методика. Використані загальні та спеціальні методи теоретичних та розрахункових методів дослідження, нормативно-правові документи з охорони праці. Висновки. При зміні метеорологічних умов (ступеня вертикальної стійкості та швидкості вітру, температури повітря) змінюється також швидкість перенесення переднього фронту хмари зараженого повітря. Це, в свою чергу, змінює глибину перенесення повітряних мас і, відповідно, змінює масштаби зони фактичного хімічного забруднення. До основних змінних, що визначають формування рівня забруднення атмосфери, відносяться напрям переносу хмари НХР, швидкість їх перенесення, атмосферна стійкість і пов'язана з нею ступінь вертикального перемішування шкідливих домішок, термічний стан повітряної маси, від якого залежить початковий підйом викидів, вимивання НХР опадами, акумуляція їх у туманах, інерційний фактор. Зона хімічного забруднення – це територія, на якій небезпечні хімічні речовини перебувають в концентраціях, небезпечних для людини та інших живих організмів, що знаходяться в цій зоні. З урахуванням цього фактора і необхідно приймати рішення щодо рятувальних робіт, адже на кожній складовій ділянці забрудненої території будуть різні концентрації НХР. При виборі заходів та способів захисту населення необхідно враховувати не тільки фізико-хімічні та токсичні властивості НХР, масштаби забруднення, а і метеорологічні умови та характер місцевості, на якій будуть проводитися аварійно-рятувальні роботи. Наукова новизна. Запропоновано спосіб прогнозування впливу метеорологічних умов та характеристики місцевості за умов надзвичайної ситуації небезпечних хімічних речовин в приземному шарі атмосфери. Запропоновано доповнення до нормативних і правових документів з цивільного захисту. Практична цінність. Розроблені рекомендації сприятимуть врахування метеорологічних умов та характеру місцевості при прогнозуванні масштабів розповсюдження хмари забрудненого повітря при аварії з

¹ канд. техн. наук, доцент, Український державний університет науки та технологій, ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-5384-7040, natalimitina0000@gmail.com

² викладач, Український державний університет науки та технологій, ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0001-8127-0077, plisbig@gmail.com

³ PhD, ст. викладач, Український державний університет науки та технологій, ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0001-7282-8243, olhakohtieva@gmail.com

⁴ канд. техн. наук, доцент, Український державний університет науки та технологій, ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0003-3369-4267, gerasim_vlad@ukr.net

⁵ асистент, Український державний університет науки та технологій, ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0001-9555-6471, mininayuliya1985@gmail.com

НХР та правовому регулюванню цивільного захисту з діючими нормами законодавства у сфері цивільної безпеки.

Ключові слова: методика, аварія, метеорологічні умови, прогнозування, небезпечно хімічні речовини, нормативне-правове забезпечення.

N. Mitina, M. Plys, O. Kohtieva, V. Herasymenko, Y. Minina. Substantiation of the influence of meteorological and topographical conditions on the spread of a cloud of polluted air. Objective. To substantiate the significant influence of meteorological conditions and terrain (topographic conditions) on the behaviour of hazardous chemicals (HCS) in the atmosphere (environment) in the event of an accident at a chemical hazardous facility (CHF) with its release (discharge), taking into account that these conditions can change in space and time. Methods. The general and special methods of theoretical and computational research methods, regulatory and legal documents on labour protection were used. Conclusions. Changes in meteorological conditions (degree of vertical stability and wind speed, downwind temperature) also change the speed of the contaminated air cloud front. This, in turn, changes the depth of the air mass transfer and, accordingly, changes the extent of the actual chemical contamination zone. The main variables that determine the formation of the level of atmospheric pollution include the direction of transfer of the cloud of HCHs, the speed of their transfer, atmospheric stability and the degree of vertical mixing of harmful impurities associated with it, the thermal state of the air mass, which determines the initial rise of emissions, the leaching of HCHs by precipitation, their accumulation in fogs, and the inertial factor. A chemical pollution zone is an area where hazardous chemicals are present in concentrations that are dangerous for humans and other living organisms in the area. This factor should be taken into account when making decisions on rescue operations, as each component part of the contaminated area will have different concentrations of HCS. When choosing measures and methods of protection of the population, it is necessary to take into account not only the physicochemical and toxic properties of CWA, the scale of contamination, but also meteorological conditions and the nature of the area where emergency rescue operations will be carried out. Scientific novelty. A method for predicting the impact of meteorological conditions and terrain characteristics in the event of an emergency situation with hazardous chemicals in the surface layer of the atmosphere is proposed. Additions to regulatory and legal documents on civil protection are proposed. Practical value. The developed recommendations will facilitate the consideration of meteorological conditions and terrain when predicting the extent of the spread of a cloud of contaminated air in the event of a CBR accident and the legal regulation of civil protection in accordance with the current norms of legislation in the field of civil security.

Keywords: methodology, accident, meteorological conditions, forecasting, hazardous chemicals, regulatory and legal support.

Постановка проблеми. При аварії на хімічно-небезпечному об'єкті (ХНО) з виливом (викидом) небезпечної хімічної речовини (НХР) її фізичні, хімічні та токсичні властивості та метеорологічні умови і характер місцевості (рослинний покрив, рельєф, забудова), вступаючи в певну взаємодію, утворюють хімічну обстановку. З метою вдосконалення порядку оцінки хімічної обстановки шляхом прогнозування масштабів забруднення в разі виникнення аварії з виливом (викидом) НХР із технологічних ємностей на хімічно небезпечних об'єктах, автомобільному, річковому, залізничному та трубопровідному транспорті, в 2019 році наказом МВС України введена в дію «Методика прогнозування наслідків виливу (викиду) небезпечних хімічних речовин під час аварій на хімічно небезпечних об'єктах і транспорті» (далі Методика 2019) [1].

В основу Методики 2019 покладено математичні розрахунки з використанням формул та розрахункових таблиць, параметрів, що характеризують технічні особливості ХНО, метеорологічні умови та характер навколишньої місцевості (метеорологічні та топографічні умови).

Методика 2019 застосовується для хімічних речовин, що перебувають у рідкому або газоподібному стані та при потраплянні в атмосферу утворюють хмару зараженого повітря

(первинну і вторинну). Розрахунки передбачається проводити для приземного шару повітря до висоти 10 м над поверхнею землі [1].

Аналіз останніх джерел та публікацій. У попередніх публікаціях [6-9] автори проаналізували суть прогнозування та недоліки зазначеної Методики 2019 в частині алгоритму математичних розрахунків та їх логічності і складності.

На необхідність врахування метеорологічних умов та характеру місцевості при прогнозуванні масштабів розповсюдження хмари забрудненого повітря при аварії з НХР в 1989 році вказала група фахівців в сфері цивільної оборони під керівництвом кандидата хімічних наук В.О. Володимирова [10].

Ґрунтовне дослідження особливостей розповсюдження небезпечних хімічних речовин в приземному шарі атмосфери за умов надзвичайної ситуації (НС) проведено О.О. Поповим та його колегами [11]. Ними встановлено, що найбільш визначальними факторами впливу на розподіл концентрації домішок є: режим та умови викиду, вид джерела, напрямок та швидкість вітру, стан атмосфери, хімічна взаємодія з іншими речовинами в атмосферному повітрі, гравітаційне осадження, вимивання опадами, поглинання підстильною поверхнею, рельєф місцевості. Предметом їх дослідження був промисловий майданчик атомної електростанції (АЕС). А тому є певні особливості впливу метеорологічних умов та характеру місцевості на забруднюючі речовини при їх попаданні в повітря: при аварії на АЕС забруднення повітря і його розповсюдження відбувається зверху вниз (небезпечні речовини викинуті вибухом), а при аварії з НХР (рідка чи газоподібна) – забруднення повітря відбувається знизу вверх.

Цікавою в контексті даної статті є і публікація О.М. Бортняка, М.П. Школьного та М.М. Осипчука, які констатували, що у разі постійних за обсягом та складом викидів в результаті зміни метеорологічних умов рівень забруднення атмосферного повітря може суттєво відрізнятися. Проведені дослідження на підприємстві нафтогазового комплексу дозволяють встановити закономірності такого впливу, що є важливим для проведення оцінки стану повітряного басейну, прогнозування можливого забруднення, підготовки документації якості атмосферного повітря та розроблення природоохоронних заходів [12].

Постановка проблеми. В Методиці 2019 вказано на необхідність (і тільки!) враховувати метеорологічні та топографічні умови (фактори), але не дається пояснення та обґрунтування такої необхідності і суті процесів, що відбуваються під час їх взаємодії з фізичними, хімічними та токсичними властивостями НХР.

Мета статті – обґрунтування суттєвого впливу метеорологічних умов та характеру місцевості (топографічні умови) на характер поведінки НХР в атмосфері (навколишньому середовищі) при аварії на ХНО з її виливом (викидом) з урахуванням того, що ці умови можуть змінюватися у просторі і часі.

Виклад основного матеріалу.

Методика. Використані загальні та спеціальні методи теоретичних та розрахункових методів дослідження, нормативно-правові документи.

Результати. Розглянемо загальні відомості про місцевість та погоду. В контексті поставленої теми під поняттям «місцевість» розуміється будь-яка ділянка земної поверхні з усіма її топографічними елементами, де може виникати (виникає) надзвичайна ситуація з характерними для них факторами, що в тій чи іншій мірі можуть впливати на ураження населення і територій і на якій плануються (будуть проводитися) відповідні заходи з ліквідації наслідків НС, захисту населення і територій.

Погода – стан атмосфери, що постійно змінюється, в певному місці і в певний час з урахуванням температурних умов, величини опромінення земної поверхні сонячним світлом, наявності або відсутності опадів (дощ, град, сніг, туман і т. п.), сили вітру. Тобто погода характеризується: температурою повітря та ґрунту, атмосферним тиском, швидкістю та напрямом вітру, вологістю повітря, хмарністю, опадами, але не як окремо взятими елементами, а їх сукупністю, бо всі вони взаємозв'язані та взаємозалежні [5]. Офіційно, погода – це фізичний стан атмосфери в конкретний проміжок часу, що визначається сукупністю атмосферних явищ у конкретному районі [3, 4].

Метеорологічні умови (фактори), названі в Методиці 2019: ступінь вертикальної стійкості повітря; температура повітря; швидкість та напрямок вітру. Топографічні умови (фактори),

названі в Методиці 2019: види рослинності (лісиста, лісисто-степова, степова, напівпустинна); типи лісів (листяні, хвойні, змішані); види рельєфу (рівнинний, рівнинно-хвилястий, горбисто-балочний, горбистий, передгір'я).

При прогнозах поширення НХР зазвичай враховують і рівень вертикальної стійкості приземних шарів атмосфери (СВСП). У цих обставинах стають актуальними такі процеси, як інверсія та ізотермія, які забезпечують збереження високої концентрації НХР у приземному шарі атмосфери та поширення хмари зараженого повітря на значні відстані. Ступінь вертикальної стійкості приземного шару повітряних потоків визначається найчастіше за даними прогнозу погоди [1, додаток 3].

Інверсія (рис. 1) – ступінь вертикальної стійкості повітря в приземному шарі, за якого температура поверхні ґрунту менша за температуру повітря на висоті 1-10 м від поверхні. Виникає в ясну погоду за малої швидкості вітру (до 4 м/с) приблизно за годину до заходу сонця та зникає впродовж години після сходу сонця [1].



Рис. 1 – Інверсія

Як відомо, у приземному шарі температура повітря зі збільшенням висоти всупереч усім законам замість зниження підвищується. Найчастіше це інверсійний процес, який відбувається через те, що влітку, в безвітряні ночі, потоки повітря від нагрітої за день земної поверхні піднімаються вгору, а охолоджене на висоті 20-40 м повітря опускається вниз. Затримуючий шар заважає розвитку вертикальних рухів повітря, у зв'язку з чим під ним часто накопичуються пил і водяні пари і, як наслідок, формуються шари туману або диму. Інверсія не сприяє розсіюванню по висоті та утворює найбільш відповідні умови для збереження та поширення високих концентрацій НХР. Ізотермія (рис. 2) – ступінь вертикальної стійкості повітря в приземному шарі, за якого температура поверхні ґрунту дорівнює температурі повітря на висоті 1-10 м від поверхні. Зазвичай спостерігається в хмарну погоду і за снігового покриву [1].



Рис. 2 – Ізотермія

Для ізотермії більш властиві стабільність температури повітря в деякому атмосферному шарі та, відповідно, стабільні рівноважні стани повітря. Отже, ізотермія, в основному, типова для похмурої погоди і, як правило, виникає в ранкові та вечірні години. Також як і інверсія, ізотермія

сприяє тривалому застою аерозолів та пари токсичних речовин у населених пунктах, у промислових зонах, у лісах та парках.

Конвекція (рис. 3) – ступінь вертикальної стійкості повітря в приземному шарі, за якого температура поверхні ґрунту більша за температуру повітря на висоті 1-10 м від поверхні. Виникає в ясну погоду за малої швидкості вітру (до 4 м/с) приблизно через 2 години після сходу сонця і руйнується приблизно за 2-2,5 години до заходу сонця [1].



Рис. 3 – Конвекція

Конвекція – процес вертикального переміщення повітряних мас з одних висот на інші, який визначає рух теплішого повітря вгору, а холодного, що є більш щільним, – вниз. Зазвичай таке явище, що має назву конвекції, можна спостерігати влітку в денні години за безвітряної і ясної погоди. Потоки повітря, що піднімаються вгору, розсіюють хмару токсичних речовин, що перешкоджає поширенню аварійно-хімічно небезпечних речовин. Конвекція викликає розсіювання зараженої хмари, тобто зниження концентрації парів отруйних речовин. З цього випливає, що головну роль у поширенні хмари отруйних речовин відіграють три важливі атмосферні процеси: інверсія, ізотермія та конвекція.

Прогнозування хімічної обстановки та її оцінка за довгостроковим прогнозуванням передбачає, перш за все, визначення ступеня хімічної небезпеки ХНО та адміністративно-територіальної одиниці (АТО). При аварійному прогнозуванні та оцінці хімічної обстановки необхідно більш точно та конкретно враховувати особливості місцевості (а вона в різних частинах прогнозованої зони хімічного забруднення може бути різною) та конкретні метеорологічні умови (рис. 4), що значною мірою буде впливати на зміст рішення щодо організації та проведення аварійно-рятувальних робіт. Для підтвердження факту зміни глибини розповсюдження хмари забрудненого повітря в залежності від метеорологічних умов та характеру місцевості проведено математичне дослідження (прогнозування), наслідки якого представлені в таблицях 1, 2.

Таблиця 1

Глибина розповсюдження первинної хмари забрудненого повітря (хмари НХР), км, хлор, 20 т., період року літо

Характер місцевості: Рослинність/Рельєф	Ступінь вертикальної стійкості повітря								
	Інверсія			Ізотермія			Конвекція		
	Швидкість вітру, м/с								
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
+30° C									
Степова/Горбистий	5,38	4,88	3,75	1,80	1,70	1,34	0,72	0,50	0,42
Ліс (лист.)/Рівнинний	6,72	6,10	4,69	2,42	2,27	1,79	1,08	0,76	0,63
+20° C									
Степова/Горбистий	3,84	3,49	2,68	1,30	1,22	0,96	0,53	0,36	0,30
Ліс (лист.)/Рівнинний	4.80	4.36	3.35	1.73	1.62	1.28	0.77	0.55	0.45

За наслідками прогнозу (математичні розрахунки для первинної хмари НХР – табл. 1) та характеру схеми прогнозованої зони хімічного забруднення (рис. 4) маємо:

- зміну глибини розповсюдження первинної хмари забрудненого повітря ($\Gamma_{\text{ПХ-1}}$) в залежності від зміни метеорологічних умов з коефіцієнтом зменшення ($K_{\text{ЗМ-1}}$);
- зміну глибини розповсюдження первинної хмари забрудненого повітря ($\Gamma_{\text{ПХ-2}}$) в залежності від зміни характеру місцевості з коефіцієнтом зменшення ($K_{\text{ЗМ-2}}$).

Таблиця 2

Коефіцієнти зменшення глибини розповсюдження первинної хмари забрудненого повітря в залежності від зміни метеорологічних умов та характеру місцевості

Характер місцевості: Рослинність/Рельєф	Ступінь вертикальної стійкості повітря								
	Інверсія			Ізотермія			Конвекція		
	Швидкість вітру, м/с								
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Степова/Горбистий	Середнє значення глибини – $\Gamma_{\text{ПХ-1}} / K_{\text{ЗМ-1}}$								
	При +30 °С								
	4,67/1,0			1,6/2,9			0,55/8,5		
	При +20 °С								
	3,34/1,0			1,16/2,87			0,39/8,56		
Ліс (лист.)/Рівнинний	Середнє значення глибини – $\Gamma_{\text{ПХ-2}} / K_{\text{ЗМ-2}}$								
	При +30 °С								
	5,84/1,0			2,16/2,7			0,82/7,12		
	При +20 °С								
	4,17/1,0			1,54/2,7			0,59/7,06		

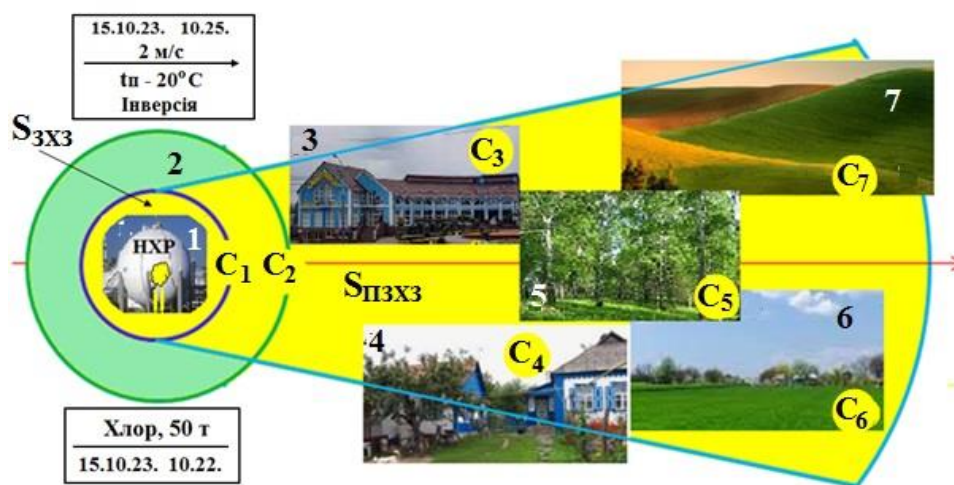


Рис. 4 – Схема прогнозованої зони хімічного забруднення: 1 – хімічно небезпечний об'єкт – промислова зона; 2 – санітарно-захисна зона; 3 – забудова, місто; 4 – забудова, село; 5 – ліс листяний; 6 – рівнинна місцевість; 7 – горбиста місцевість; $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7$ – концентрації НХР в різних точках прогнозованої зони хімічного забруднення.

Глибина зони поширення забрудненого повітря залежить від концентрації НХР та швидкості вітру. Наприклад, при швидкості вітру 1 м/с за одну годину хмара від місця аварії переміститься на 5-7 км, при 2 м/с – на 10-14 км, а при 3 м/с – на 16-21 км. Збільшення швидкості вітру сприятиме швидкому розсіюванню хмари НХР. Збільшення температури ґрунту (чи поверхні, на якій розлилась НХР) та навколишнього повітря прискорює випаровування НХР, а, отже, збільшує концентрацію його над забрудненою територією. На глибину поширення хмари НХР та величину його концентрації значною мірою впливатимуть вертикальні переміщення повітряних мас, тобто ступінь вертикальної стійкості повітря. На графіку (рис. 5) показано зміну глибини хімічного забруднення повітря ($\Gamma_{\text{ПЗХЗ}}$), ширини ($\Pi_{\text{ПЗХЗ}}$) та зміну концентрації НХР (C_1, C_2, C_3, C_4)

в межах прогнозованої зони хімічного забруднення в часі і відстані від осевої лінії напрямку вітру (вісь сліду). Із збільшенням відстані від місця аварії та відстані від осі сліду концентрація НХР зменшується. Цей висновок стосується тільки рівнинної місцевості без наявності лісу та забудови. В усіх інших випадках слід враховувати особливості, представлені на рис. 4.

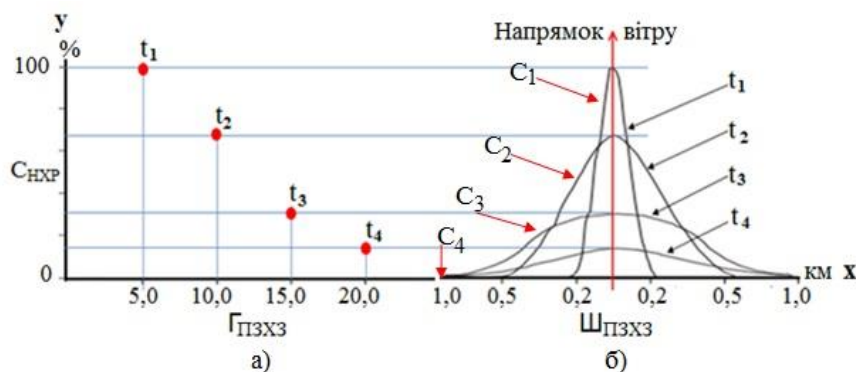


Рис. 5 – Вплив вітру на зміну концентрації в хмарі НХР з часом: а) вид із боку; б) вид у розрізі перпендикулярно до напрямку вітру

Нерівності земної поверхні (рельєф) впливають на турбулентність повітряних мас, які, у свою чергу, здатні змінити концентрацію небезпечних речовин у більшу чи меншу сторону, а наявність рослинності та характер забудови змінюють характер переміщення забруднених повітряних мас, що, в свою чергу, також впливає на глибину забруднення та зміну концентрації НХР і, відповідно, на характер ураження, що переконливо показав своїми дослідженнями В. Маршалл [13]. З цього випливає, що розглянуті параметри суттєво впливають і на загальну площу зони хімічного забруднення НХР. Аналіз вивчених документів та публікацій, проведених математичних та графічних досліджень показав, що висока температура верхнього шару земної кори та нижніх шарів атмосфери забезпечує швидке випаровування токсичних речовин із заражених поверхонь. При цьому вітер «розносить» (розвіює) пари токсичних речовин, знижуючи їхню концентрацію. При цьому необхідно відзначити, що в суху, тиху та прохолодну погоду токсичні речовини швидко осідають на поверхні будівель, асфальтових покриттів, інших предметах і можуть зберігати високу концентрацію тривалий час. Взимку випаровування небезпечних речовин також незначне, отже, і зараження місцевості, де відбувся їхній викид, буде тривалим.

Істотно впливають на поширення НХР і тумани. Це відбувається через те, що багато токсичних речовин добре розчиняються у воді. При великій вологості повітря НХР поглинаються водяними парами і перетворюються на кислоти. Загальновідомим фактом у колі фахівців є приклад перетворення сірчистого газу на сірчану кислоту: $\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{S O}_3$. Інші приклади: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{CO}_3$, $\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{HCl} + \text{HClO}$, $\text{H}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2$.

У випадку з туманами концентрація небезпечних речовин у навколишньому середовищі може виявитися значно більшою, ніж за його відсутності. Даний факт можна пояснити ще й тим, що на верхній межі туману створюється підвищена інверсія температури, а в самому тумані відзначатиметься зниження температури з висотою або ізометрія. Причому під час туманів у приземному шарі може виявитися повний штиль.

Таким чином, метеорологічні умови істотно впливають на перенесення та розсіювання шкідливих речовин, що надходять в атмосферу. При цьому зміна вмісту шкідливих речовин в атмосфері відбувається під дією атмосферних процесів (зокрема, інтенсивність випаровування). Про летючість і тривалість уражаючої дії прийнято судити за температурою кипіння речовини. Чим вища температура кипіння, тим повільніше випаровується речовина, і стійкість її буде вищою, ніж у речовин, що мають меншу температуру кипіння, при цьому над забрудненою ділянкою можуть утворюватися летальні концентрації НХР. Отже, за певної температури повітря швидкість випаровування НХР різна. Будь-яка конкретна речовина за різних температурних умов випаровується швидше чи повільніше, але, зазвичай, зі зниженням температури стійкість НХР зростає, що, в свою чергу, впливає на час її уражальної дії [1, додаток 15].

Розглянемо вплив характеру місцевості на вітер і концентрацію НХР. Велике значення у разі поширення токсичних речовин грає рельєф місцевості. У знижених формах рельєфу повітряні маси застоюються, у зв'язку з чим відбувається посилення небезпеки зараження території, особливо тими НХР, які важчі за повітря. Нерівності земної поверхні впливають і на турбулентність повітряних мас, які, у свою чергу, здатні змінити концентрацію небезпечних речовин у більшу чи меншу сторону. Окремий хребет (пагорб) відхиляє вітер, сприяє утворенню завихрення на навітряному та особливо підвітряному схилі і посиленню вітру на вершині і бокових схилах. На забруднене повітря хребет (пагорб) впливає через завихрення і розтягування хмари в довжину і ширину (рис. 6). Хребет при достатній його висоті відхиляє вітер на навітряному схилі у бік тупого кута, утвореного напрямком вітру і віссю хребта. У сідловині вітер підсилюється, а на навітряному і підвітряному схилах слабшає. Після подолання хребта вітер вирівнюється і повертається до початкового режиму на відстані, рівній 8-10-кратній висоті хребта. На забруднене повітря хребет впливає внаслідок розтягання хмари в усіх напрямках і посилення вітру в сідловині (рис. 6).

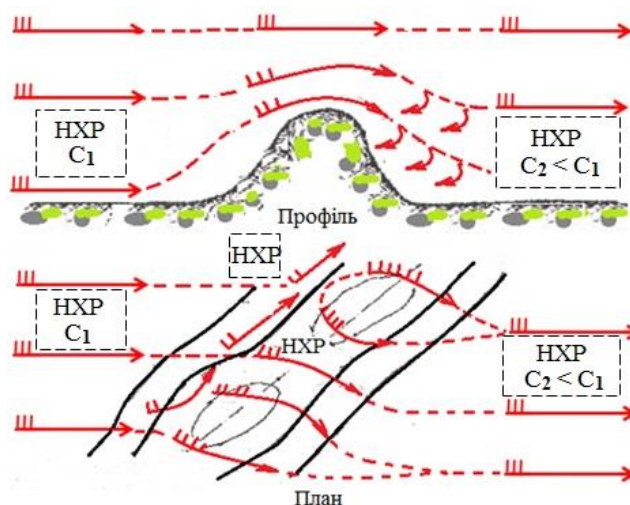


Рис. 6 – Вплив хребта на вітер і концентрацію НХР

Лощина не впливає на напрямок повітряного потоку, але послаблює вітер до повного затишку в її глибині. В лощині можливий застій забрудненого повітря. Глибока лощина при вітрі, спрямованого перпендикулярно до неї, звичайно є місцем застою забрудненого повітря, тому що велика частина повітря проноситься над нею, а в самій лощині вітер слабшає іноді до повного штилю, особливо при інверсії (рис. 7).

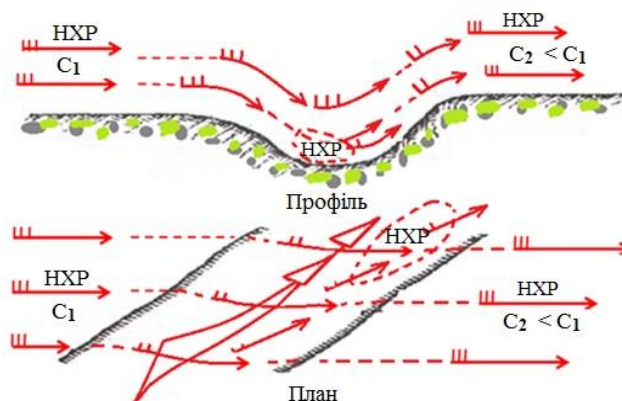


Рис. 7 – Вплив лощини на вітер і концентрацію НХР

Якщо забруднене повітря зустрічає широку лощину з пологими схилами, то він спускається на її дно і піднімається по протилежному схилу без істотних змін в своїх параметрах. Якщо лощина утворить з напрямком вітру гострий кут, то при достатній крутості її країв у лощині виникає місцевий вітер невеликої швидкості, що діє уздовж лощини у бік тупого кута між напрямком вітру і краями лощини. У даному випадку можливе відхилення частини забрудненого повітря від загального напрямку руху. Якщо напрямок вітру близький до напрямку осі лощини, то велика частина забрудненого повітря переміщається уздовж лощини і при тому на великі відстані.

Долини з високими і крутими, на великій відстані берегами являються шляхами глибокого проникнення повітря, зараженого НХР, на незаражену місцевість. В умовах гірського рельєфу вплив окремих вершин, хребтів, лощин і долин загалом аналогічний впливу відповідних форм горбуватого рельєфу, але виявляє себе різко та охоплює шар повітря набагато більшої глибини. Специфічним явищем гірського рельєфу звичайно є місцеві вітри, зокрема, гористо-долинні. Ці вітри спостерігаються в літню пору при ясній погоді на схилах гірських долин (полонин): вночі холодні маси повітря стікають по схилах у долину, а вдень більш тепле долинене повітря піднімається по схилах на гору. Тривалість уражаючої дії НХР в лощинах, долинах значно вище, ніж на вершинах пагорбів і хребтах.

Вплив рослинного покриву на поведінку забрудненого повітря може бути різним. У тому випадку, коли заражене повітря зустрічає на своєму шляху ліс, загальна ефективність зараження знижується. Заражене повітря обтікає ліс в основному над кронами дерев, причому виникають завихрення, що зберігаються і на підвітряній стороні лісу на відстані до 500 м. Завихрення сприяють більш швидкому розсіюванню НХР. Частина забрудненого повітря затікає в ліс з навітряної сторони на глибину до 300 м і створює там зону сильного забруднення (рис. 8).

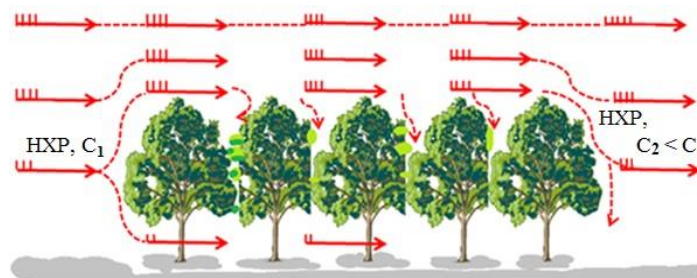


Рис. 8 – Вплив лісу на вітер і концентрацію НХР

У результаті розсіювання парів НХР і утворення їх застою у лісі концентрація НХР у забрудненому повітрі при проходженні лісу знижується, знижується і глибина розповсюдження хмари забрудненого повітря в залежності від ступеня вертикальної стійкості повітря – табл. 3. У тому випадку, коли забруднення повітря виникає в самому лісі, високі концентрації НХР будуть зберігатися досить довго. Рослинний покрив набагато збільшує тривалість забруднення місцевості НХР.

Таблиця 3

Коефіцієнт зменшення глибини розповсюдження хмари НХР [2]

СВСП	Лісовий масив	Місто	Село
Інверсія	1,8	3,5	3
Ізотермія	1,7	3	2,5
Конвекція	1,5	3	2

Примітка: Кожен кілометр лісу, забудови зменшує глибину розповсюдження хмари НХР на відповідний коефіцієнт

Населені пункти впливають на характер поведінки зараженого повітря аналогічно впливу лісу. Забруднене повітря, обтікаючи населений пункт, розсіюється, а в самому населеному пункті створюються зони часткового застою (рис. 9). Різного роду будівлі в залежності від їх характеру

і розташування в тій чи іншій мірі сприяють підвищенню тривалості зараження НХР (особливо стійкими). Міська чи сільська забудова водночас виступають перешкодою для розповсюдження забрудненого повітря. Коефіцієнти зменшення цієї глибини – табл. 3.

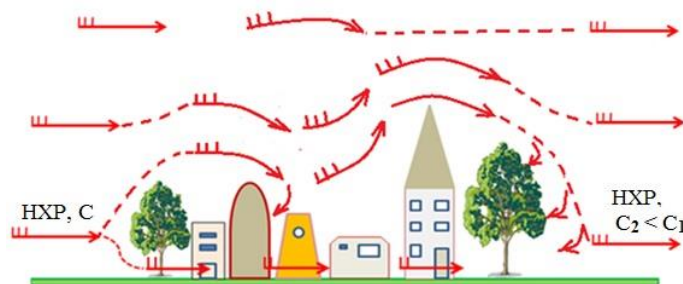


Рис. 9 – Вплив населеного пункту на вітер і концентрацію НХР

Прогнозування масштабів хімічного забруднення повітря в умовах міста тісно пов'язане з його кліматом. До того ж клімат міста неможливо розглядати ізольовано, оскільки він є статистичною сукупністю багатьох щоденних погодних подій, що виникають на території міста. Крім того, слід враховувати той фактор, що на міських вулицях температура повітря завжди на кілька градусів вище, ніж у сільській місцевості. Тому в місті спостерігається інтенсивний рух повітря, пов'язаний зазвичай з його переміщенням від околиць до центру по магістральних вулицях. Це сприяє проникненню токсичних речовин у двори, тупики, колектори, підвали і створює підвищену небезпеку для життя і здоров'я міського населення. Таким чином, при проведенні розрахунків необхідно враховувати той фактор, що стійкість небезпечних хімічних речовин в міських кварталах буде вище, ніж на відкритій місцевості. Погодні умови на будь-якій місцевості регулюються багато масштабними атмосферними явищами. В той же час кожен із районів міста змінює в тій чи іншій мірі локальні умови прирубіжного шару атмосфери. В певних погодних умовах можуть домінувати або масштабні процеси, або локальні, хоч в усіх випадках мають місце і ті, і інші. При наявності розвинутих синоптичних процесів, які характеризуються сильним вітром, хмарністю та опадами, впливом локальних умов можна знехтувати. У тих випадках, коли швидкість вітру мала, небо вдень і вночі безхмарне, вплив локальних умов, обумовлених характером міста, переважає синоптичні процеси і ними нехтувати не можна. Найбільший вплив місто чинить на температуру повітря, що спричиняє виникнення в місті так званого острова тепла. Температурні контрасти більш за все проявляються у вечірні часи, безпосередньо перед заходом сонця і після заходу. Максимальна різниця між температурою в місті і на відкритій місцевості фіксується зазвичай через 2-3 години після заходу сонця і зникає в невеликих містах невдовзі після півночі, а в великих містах острів тепла зберігається усю ніч.

Наявність острова тепла в сукупності з шершавістю підстильної поверхні чинить значний вплив на швидкість і напрямок вітру у поверхні землі і на ступінь вертикальної стійкості повітря, який може не співпадати з СВСП на відкритій місцевості. Острів тепла обумовлює формування в умовах ночі нестійких стратифікацій (розподіл на шари), які викликають підйом повітряних мас, на зміну яким від окраїн міста рухаються більш холодні маси повітря. При цьому необхідно відмітити, що направлений рух повітря вночі до центра міста непостійний. У великих містах ізотерми (лінії на карті, схеми, які відповідають однаковій температурі повітря на місцевості) острова тепла, як правило, згущуються на краю щільно забудованої зони. Ця особливість може приводити до різких пульсацій більш холодного повітря, що проникає в місто. Середня швидкість вітру в місті менша, ніж на відкритій місцевості, і в 65% випадків коефіцієнт зменшення складає біля 0,7, крім того, в місті різко збільшується кількість безвітряних днів, а максимальні швидкості вітру спостерігаються в середньому на 10-20% рідше, тобто на 10 випадків максимальної швидкості вітру на відкритій місцевості, в місті їх буде 9-8.

Особливості розповсюдження НХР тісно пов'язані з розглянутими процесами і повинні визначатися в кожному конкретному випадку з урахуванням властивостей НХР і умов її зберігання.

У випадках зруйнування ємності із зрідженим газом або з НХР, що має низьку температуру кипіння, перевага гравітаційних факторів (властивість матерії, що проявляється у взаємному притяганні тіл) в початковий момент розповсюдження НХР приводить до того, що напрямку руху хмари і швидкість її руху будуть в основному визначатися рельєфом місцевості. Внаслідок застою в низинах і підвалах міських будівель можуть виникати значні концентрації, які будуть уражати усіх, хто опиниться в зоні зараження.

У подальшому розповсюдження НХР буде визначатися швидкістю і напрямком вітру. Напрямок руху, як правило, буде співпадати з міськими магістралями, вулицями. Вночі можливе затікання хмари НХР до центру міста, завдяки руху холодних мас повітря від окраїн.

У випадках співпадіння напрямку руху хмари НХР з напрямком міських транспортних магістралей глибина розповсюдження повинна визначатися як для рівної місцевості, тобто за таблицями, без врахування відповідного коефіцієнту для міської забудови. При неспівпадінні напрямку вітру з напрямком таких магістралей, або ж коли такі відсутні (безсистемна забудова), оцінку глибини розповсюдження хмари НХР необхідно визначити з урахуванням коефіцієнта (табл. 4). На узбережжях морів, великих озер і рік у теплий час року при малоохмарній і тихій погоді виникають місцеві вітри узбережжя – бризи. Бризи характеризуються півдобовою зміною напрямку вітру: уночі вітер дме з берега в море (нічний чи береговий бриз), а вдень – з моря на берег (денний чи морський бриз). При сприятливих умовах погоди і місцевості бризи поширюються на великі відстані і дмухають з помірними швидкостями – до 4-6 м/с. У прибережних районах поводження хмари забрудненого повітря буде підкорятися режиму бризів.

Висновки

1. Під метеорологічними елементами розуміється загальна назва ряду характеристик стану повітря та деяких атмосферних процесів. До метеорологічних елементів насамперед відносять ті характеристики стану атмосфери та атмосферні процеси, які безпосередньо спостерігаються на метеорологічних станціях: атмосферний тиск, температура та вологість повітря, вітер (горизонтальний рух повітря), хмарність (за кількістю та формами), кількість і вид опадів, що випадають, видимість, тумани, хуртовини та ін. Сюди ж відносяться тривалість сонячного сяйва, температура та стан ґрунту, висота та стан снігового покриву та ін.

2. При зміні метеорологічних умов (ступеня вертикальної стійкості та швидкості вітру, температури повітря) змінюється також швидкість перенесення переднього фронту хмари зараженого повітря. Це, в свою чергу, змінює глибину перенесення повітряних мас і, відповідно, змінює масштаби зони фактичного хімічного забруднення.

3. До основних змінних, що визначають формування рівня забруднення атмосфери, відносяться напрям переносу хмари НХР, швидкість їх перенесення, атмосферна стійкість і пов'язана з нею ступінь вертикального перемішування шкідливих домішок, термічний стан повітряної маси, від якого залежить початковий підйом викидів, вимивання НХР опадами, акумуляція їх у туманах, інерційний фактор.

4. Зона хімічного забруднення – це територія, на якій небезпечні хімічні речовини перебувають в концентраціях, небезпечних для людини та інших живих організмів, що знаходяться в цій зоні. З урахуванням цього фактора і необхідно приймати рішення щодо рятувальних робіт, адже на кожній складовій ділянці забрудненої території будуть і різні концентрації НХР.

5. При виборі заходів та способів захисту населення необхідно враховувати не тільки фізико-хімічні та токсичні властивості НХР, масштаби забруднення, а і метеорологічні умови та характер місцевості, на якій будуть проводитися аварійно-рятувальні роботи.

Перелік використаних джерел:

1. Методика прогнозування наслідків виливу (викиду) небезпечних хімічних речовин під час аварії на хімічно небезпечному об'єкті і транспорті : наказ Міністерства внутрішніх справ України від 29.11.2019 р. № 1000. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0440-20#Text> (дата звернення: 15.06.2024).
2. Методика прогнозування наслідків виливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті : наказ Міністерства України з питань

- надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи, Міністерства аграрної політики України, Міністерства економіки України, Міністерства екології та природних ресурсів України від 27.03.2001 р. № 73/82/64/122. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0326-01#Text> (дата звернення: 10.06.2024).
3. ДСТУ 3513:2021. Метеорологія. Терміни та визначення основних понять. [Чинний від 2021-11-01]. Київ : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості», 2021.
 4. ДСТУ 3992-2000. Кліматологія. Терміни та визначення основних понять. [Чинний від 2000-10-31]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2001. 40 с.
 5. Настанова з метеорологічного прогнозування. Київ: Український гідрометеорологічний центр, 2019. 35 с. URL: https://www.meteo.gov.ua/f/pro_nas/normativni_akt/Nas-tanova%20z%20meteoprognozuvannia.pdf (дата звернення: 08.05.2024).
 6. Сипко В. Г., Кондратюк В. М., Плис М. М. Щодо впорядкування деяких положень методики прогнозування наслідків аварій на ХНО. *Сучасні проблеми професійної та цивільної безпеки* : тези доповідей I Міжнародної наук.-практ. інтернет-конф., м. Дніпро, 28 квіт. 2020 р. Дніпро : ДВНЗ «УДХТУ», 2020. С. 109-111.
 7. Зауваження та пропозиції щодо «Методики прогнозування наслідків виливу (викиду) небезпечних хімічних речовин під час аварії на хімічно небезпечному об'єкті і транспорті» / Мітіна Н. Б., Музика І. А., Плис М. М., Сипко В. Г. *Сучасні проблеми професійної та цивільної безпеки* : тези доповідей II Міжнародної наук.-практ. інтернет-конф., м. Дніпро, 24 квіт. 2022 р. Дніпро : ДВНЗ «УДХТУ», 2022. С. 50-60.
 8. Плис М. М., Мітіна Н. Б., Малиновська Н. В. Прогнозування та оцінка хімічної обстановки на хімічно небезпечних об'єктах: навч. посіб. Дніпро: ДВНЗ «УДХТУ», 2024. 135 с.
 9. Аналіз методики прогнозування наслідків аварії на хімічно небезпечних об'єктах на предмет її практичного використання за призначенням / Н. Б. Мітіна та ін. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2022. № 5. С. 60-68. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.251022.60.893>.
 10. Стрілець В. В. Попередження надзвичайних ситуацій терористичного характеру, пов'язаних з малооб'ємним вибухом небезпечних хімічних речовин: дис. ... канд. техн. наук : 21.02.03. Харків, 2020. 194 с.
 11. Фізичні особливості розповсюдження забруднюючих речовин в атмосферному повітрі за умов надзвичайної ситуації на АЕС / О. О. Попов та ін. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2019. Вип. 4(84). С. 88-98. DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.4\(84\).11](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.4(84).11).
 12. Бортняк О. М., Школьнік М. П., Осипчук М. М. Аналітичні дослідження розповсюдження в атмосферному повітрі шкідливих речовин, що містяться у викидах стаціонарних джерел промислових підприємств нафтогазового комплексу. *Нафтогазова енергетика*. 2013. № 1(19). С. 15-25.
 13. Аверин Г. В. Анализ опасностей аммиачных компрессорных установок методом построения «дерева отказов». *Екологічна безпека*. 2008. Вип. 3-4/2008(3-4). С. 9-16.

References:

1. Order of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine. № 1000, 29.11.2019. *Metodyka prohnorozuvannia naslidkiv vylyvu (vykydu) nebezpechnykh khimichnykh rehovyn pid chas avarii na khimichno nebezpechnomu obiekty i transporti* [Methodology for predicting the consequences of a spill (release) of hazardous chemicals during an accident at a chemically hazardous facility and transport]. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0440-20#Text>. Accessed on: June 15, 2024. (Ukr.)
2. Order of the Ministry of Ukraine for Emergencies and Protection of the Population from the Consequences of the Chernobyl Disaster, the Ministry of Agrarian Policy of Ukraine, the Ministry of Economy of Ukraine, the Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine. № 73/82/64/122, 27.03.2001. *Metodyka prohnorozuvannia naslidkiv vylyvu (vykydu) nebezpechnykh khimichnykh rehovyn pry avariakh na promyslovykh ob'iektakh i transporti* [Methodology for predicting the consequences of spills (emissions) of hazardous chemicals in accidents at industrial

- facilities and transport]. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0326-01#Text>. Accessed on: June 10, 2024. (Ukr.)
3. *Meteorolohiia. Terminy ta vyznachennia osnovnykh poniat* [Meteorology. Terms and definitions of basic concepts], State standart 3513:2021, 2021. (Ukr.)
 4. *Klimatolohiia. Terminy ta vyznachennia osnovnykh poniat* [Climatology. Terms and definitions of basic concepts], State standart 3992-2000, 2001. (Ukr.)
 5. *Nastanova z meteorolohichnoho prohnouzuvannia* [Meteorological forecasting guide]. Kyiv, Ukraine: Ukrainyskiy hidrometeorolohichnyi tsentr Publ., 2019. 35 p. [Online]. Available: https://www.meteo.gov.ua/f/pro_nas/normativni_akt/Nastanova%20z%20meteoprognouvan-nia.pdf. Accessed on: May 08, 2024. (Ukr.)
 6. V.H. Sypko, V.M. Kondratiuk, and M.M. Plis, «Shchodo vporiadkuvannia deiakykh polozhen metodyky prohnouzuvannia naslidkiv avarii na KhNO» [«On streamlining some provisions of the methodology for predicting the consequences of accidents at nuclear power plants»], in Proc. I Int. Sci.-Techn. Internet-Conf. «Modern problems of professional and civil safety», Dnipro, 2020, pp. 109-111. (Ukr.)
 7. N.B. Mitina, I.A. Muzyka, M.M. Plis, and V.H. Sypko, «Zauvazhennia ta propozytsii shchodo «Metodyky prohnouzuvannia naslidkiv vylyvu (vykydu) nebezpechnykh khimichnykh rehovyn pid chas avarii na khimichno nebezpechnomu ob'ekti i transporti»» [«Comments and suggestions on the «Methodology for predicting the consequences of a spill (release) of hazardous chemicals during an accident at a chemically hazardous facility and transport»»], in Proc. II Int. Sci.-Techn. Internet-Conf. «Modern problems of professional and civil safety», Dnipro, 2022, pp. 50-60. (Ukr.)
 8. M.M. Plis, N.B. Mitina, and N.V. Malynovska, *Prohnouzuvannia ta otsinka khimichnoi obstanovky na khimichno nebezpechnykh ob'ektakh: navch. posib.* [Forecasting and assessment of the chemical situation at chemically hazardous facilities: training manual]. Dnipro, Ukraine, 2024. (Ukr.)
 9. N.B. Mitina, M.M. Plis, V.A. Gerasimenko, N.V. Malynovska, and O.V. Smirnova, «Analiz metody prohnouzuvannia naslidkiv avarii na khimichno nebezpechnykh ob'ektakh na predmet yii praktychnoho vykorystannia za pryznachenniam» [«Analysis of the method for forecasting the consequences of an accident at chemically dangerous objects in the subject of its practical use as intended»], *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury – Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture*, № 5, pp. 60-68, 2022. doi: 10.30838/J.BPSACEA.2312.251022.60.893. (Ukr.)
 10. V.V. Strilets, «Poperedzhennia nadzvychainykh sytuatsii terorystychnoho kharakteru, poviazanykh z malo-ob'iemnym vybukhom nebezpechnykh khimichnykh rehovyn» [«Prevention of terrorist emergencies related to small-scale explosions of hazardous chemicals»], PhD Thesis, Kharkiv, Ukraine, 2020. (Ukr.)
 11. O. Popov et al., «Fizychni osoblyvosti rozpovsiudzhennia zabrudniuiuchykh rehovyn v atmosferному povitri za umov nadzvychainoi sytuatsii na AES» [«Physical Features of Pollutants Spread in the Air During the Emergency at NPPs»], *Yaderna ta radiatsiina bezpeka – Nuclear and Radiation Safety*, vol. 4(84), pp. 88-98, 2019. doi: 10.32918/nrs.2019.4(84).11. (Ukr.)
 12. O.M. Bortniak, M.P. Shkolnyi, and M.M. Osypchuk, «Analitichni doslidzhennia rozpovsiudzhennia v atmosferному povitri shkidlyvykh rehovyn, shcho mistiatsia u vykydakh statsionarnykh dzherel promyslovykh pidpriemstv naftohazovoho kompleksu» [«Analytical studies of the distribution in atmospheric air of harmful substances contained in emissions from stationary sources of industrial enterprises of the oil and gas complex»], *Naftohazova enerhetyka – Oil And Gas Power Engineering*, № 1(19), pp. 15-25, 2013. (Ukr.)
 13. H.V. Averyn, «Analiz opasnosti ammyachnykh kompressornykh ustanovok metodom postroeniya «dereva otkazov»» [«Analysis of the hazards of ammonia compressor units using the «fault tree» method»], *Ekolohichna bezpeka – Environmental safety*, vol. 3-4/2008(3-4), pp. 9-16, 2008. (Rus.)

Стаття надійшла 08.10.2024

Стаття прийнята 18.11.2024