

Фізичні особливості розповсюдження забруднюючих речовин в атмосферному повітрі за умов надзвичайної ситуації на АЕС

- **Попов О. О.**
Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України»,
м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5065-3822>
- **Яцишин А. В.**
Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України»,
м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5508-7017>
- **Ковач В. О.**
Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1014-8979>
- **Артемчук В. О.**
Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України, м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8819-4564>
- **Тарадуда Д. В.**
Національний університет цивільного захисту України, м. Харків, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9167-0058>
- **Собина В. О.**
Національний університет цивільного захисту України, м. Харків, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6908-8037>
- **Соколов Д. Л.**
Національний університет цивільного захисту України, м. Харків, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7996-689X>
- **Демент М. О.**
Національний університет цивільного захисту України, м. Харків, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4975-384X>
- **Гурковський В. І.**
ВГО «Центр досліджень проблем публічного управління», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2021-5204>
- **Ніколаєв К. Д.**
Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0404-6113>
- **Яцишин Т. М.**
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7723-2086>

■ **Дімітрієва Д. О.**

Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9029-0456>

Авторами виконано ґрунтовне дослідження особливостей розповсюдження небезпечних хімічних речовин в приземному шарі атмосфери за умов надзвичайної ситуації (НС) на проммайданчику атомної електростанції (АЕС). Для забезпечення безперервної роботи станцій на їх територіях розташовані та функціонують різні допоміжні техногенні об'єкти, які здійснюють викиди нерадіаційних забруднюючих речовин (ЗР) в атмосферне повітря. За різних негативних обставин технічного та природного характеру можуть виникати НС, зумовлені значним хімічним забрудненням атмосферного повітря в санітарно-захисній зоні та поза її межами. В основі попередження таких НС лежить моніторинг довкілля на територіях розташування техногенних об'єктів та їх превентивний прогноз. Реалізація цих заходів неможлива без використання ефективних методів, які базуються на математичних моделях забруднення довкілля викидами ЗР від техногенних об'єктів, та апаратно-програмних засобів, які реалізують ці методи. Наведено визначення та описано основні етапи розробки інформаційно-технічних методів попередження таких НС. Описано різні сценарії виникнення НС, внаслідок викиду хімічних речовин в атмосферне повітря на цих об'єктах. Розроблено концептуальну схему розповсюдження домішок в атмосфері внаслідок техногенного викиду. Детально описано особливості розповсюдження ЗР в атмосферному повітрі за стаціонарних та нестационарних умов викиду. 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 підстилаючою поверхнею, шорсткість підстилаючої поверхні, рельєф місцевості. Отримані результати будуть використані в процесі розроблення математичних моделей розповсюдження забруднюючих домішок в атмосферному повітрі від викидів АЕС під час відповідних надзвичайних ситуацій.

Ключові слова: атомна електростанція, надзвичайна ситуація, викиди забруднюючих речовин, фізичні особливості розповсюдження.

© О. О. Попов, А. В. Яцишин, В. О. Ковач, В. О. Артемчук, Д. В. Тарадуда, В. О. Собина, Д. Л. Соколов, М. О. Демент, В. І. Гурковський, К. Д. Ніколаєв, Т. М. Яцишин, Д. О. Дімітрієва, 2019

Україна має розвинену ядерну енергетичну галузь, основу якої складають чотири діючих АЕС: Хмельницька, Рівненська, Запорізька та Южно-Українська, і на найближчі десятки років наша країна планує лише нарощувати потужності цієї галузі.

Проте, АЕС є об'єктом підвищеної небезпеки, а тому перспективи їх розвитку тісно пов'язані з питаннями їх безпечного функціонування та цивільного захисту територій, населення та навколишнього природного середовища в зоні спостереження (ЗС) станції.

Як правило, вплив АЕС на довкілля асоціюються лише з радіаційним забрудненням. Проте, це не так. АЕС — це не лише ядерний реактор, а великий промисловий комплекс з відповідною інфраструктурою. Так, для забезпечення безперервної роботи станцій на їх території розташовані та функціонують різні допоміжні техногенні

об'єкти (зокрема, пуско-резервна котельня, дизель-генераторні станції, масломазутне господарство, зварювальні дільниці, дільниці металообробки тощо), які здійснюють викиди та скиди нерадіаційних забруднюючих речовин в навколишнє середовище.

Протягом всього періоду експлуатації АЕС за різних негативних обставин технічного та природного характеру (порушення технологічного процесу, вибух обладнання через влучення блискавки, несприятливі метеорологічні умови, несанкціоновані викиди тощо) можуть виникати НС, зумовлені значним хімічним забрудненням довкілля в ЗС станцій, та які здатні призвести до великих матеріальних збитків і людських жертв. Отже, під НС в роботі розуміється такі умови, за яких в атмосферному повітрі (АП) виникають концентрації забруднюючих речовин (ЗР), що перевищують гранично допустимі концентрації (ГДК).

Отже, контроль за нерадіаційними факторами дозволяє виявити ознаки НС природного та техногенного характеру в ЗС АЕС.

В основі попередження НС, зумовлених хімічним забрудненням навколишнього середовища, лежить:

- моніторинг довкілля на територіях розташування техногенних об'єктів, який дозволяє в режимі реального часу бачити стан компонентів навколишнього середовища і на основі цього приймати відповідні управлінські рішення;

- превентивний прогноз таких НС, який охоплює: розробку гіпотетичних сценаріїв катастрофічної події; прогноз розвитку надзвичайної ситуації навколо цих катастрофічних подій; розробку комплексу організаційних та технічних заходів, спрямованих на попередження катастрофічних подій; впровадження розроблених заходів у повсякденне життя.

Отже, попередження такої НС автори розуміють як запобігання НС під час отримання прогнозу від метеорологічної служби про виникнення несприятливих погодних умов для розповсюдження ЗР, так і зменшення ризику для здоров'я персоналу АЕС та населення прилеглих територій шляхом прийняття ефективних рішень відповідальними особами на основі інформації моніторингу та превентивного прогнозу.

Реалізація цих заходів неможлива без використання ефективних методів, що базуються на математичних моделях забруднення довкілля викидами ЗР від техногенних об'єктів, та апаратно-програмних засобів, які реалізують ці методи.

Огляд літературних джерел

Аспекти цієї проблематики розглядались та вирішувались багатьма відомими вченими. Так, Borsdorff T., Carn S., Dickerson R., Yang K., Mlakar P., Verma S., Wei J., Бадяев В.В., Бликс Х., Лисиченко Г.В., Барбашев С.В., Гаргер Є.К., Герлига В.А., Забулонов Ю.Л., Коваленко Г.Д., Ковалець І.В., Сегеда С.О., Тарнавський А.Б., Топольницький М.В. займались вирішенням проблем екологічної безпеки АЕС, втім питанню щодо попередження НС у разі нерадіаційного забруднення АП в ЗС АЕС не приділялось достатньої уваги.

Питання з економічної оцінки попередження, ліквідації та наслідків НС, розробки та використання засобів і методів телекомунікації, а також

безпілотних літальних апаратів для ліквідації НС розкрито в [1], [2], [3]. Особливості побудови систем моніторингу НС різної складності описано в [4], [5]. У роботі [6] описуються методи попередження НС терористичного характеру на основі теорії акустики. Питанням розробки концептуальних підходів та технічних засобів для вирішення задач з попередження НС на територіях розташування потенційно-небезпечних об'єктів присвячені публікації [7], [8], [9], [10], [11]. Проте, проблема попередження НС природного та техногенного характеру внаслідок хімічного забруднення АП в ЗС АЕС, до цього часу залишається невирішеною. Тому робота з розробки нових методів попередження таких НС є актуальною, своєчасною та важливою для розвитку ядерної енергетики та України загалом.

З огляду на вищесказане автори цієї публікації розпочинають роботу з розробки нових інформаційно-технічних методів попередження НС природного та техногенного характеру в ЗС АЕС.

Інформаційно-технічний метод — це метод, який дозволяє розв'язувати задану задачу через виконання таких п'яти етапів:

- 1) дослідження фізичних (або хімічних, біологічних тощо) особливостей функціонування досліджуваного об'єкта;
- 2) розробка математичної моделі об'єкта дослідження;
- 3) розробка інформаційно-обчислювальних процедур, які дозволяють реалізувати розроблену математичну модель;
- 4) розробка керуючого алгоритму, який реалізує відповідні процедури;
- 5) розробка апаратно-програмних або технічних засобів для практичної реалізації процедур за відповідним керуючим алгоритмом.

Метою цієї статті є дослідження фізико-хімічних особливостей розповсюдження токсичних речовин в АП за умов НС на АЕС.

Матеріали дослідження

Найбільш хімічно небезпечними техногенними об'єктами на території АЕС є пуско-резервна котельня, дизель-генераторні станції, масломазутне господарство, зварювальні дільниці, дільниці металообробки, бакове господарство хімічних реагентів, автозаправочна станція, а також обладнання, що містить озоноруйнуючі хладагенти та інші. В результаті їх функціонування утворюються різні

ЗР, які викидаються в атмосферу через димові труби різної висоти. Основними з них є: оксиди азоту, діоксид та інші сполуки сірки, вуглекислий газ, діоксид вуглецю, речовини у вигляді суспендованих твердих частинок, хлор та його сполуки, фтор та його сполуки, метан, сажа, неметанові леткі органічні сполуки, аміак, сірководень, метали та їх сполуки, фреони тощо.

З погляду математичного моделювання такі джерела викидів є стаціонарними точковими об'єктами.

НС, пов'язані із значним забрудненням АП в ЗС АЕС, можуть виникати як у штатному, так й аварійному режимі їх роботи. У першому випадку НС виникне за таких умов:

1) АЕС здійснює викиди (залпові, короткочасні або неперервні) домішок в атмосферу згідно з регламентом, але метеорологічні умови склалися такі, що ЗР не встигають розсіятись і стрімко переносяться вітром до земної поверхні, де їх концентрації стають значно вищими відповідних ГДК. У такому разі виникає НС, на яку необхідно швидко та ефективно реагувати підрозділам цивільного захисту на відповідній АЕС.

2) АЕС здійснює несанкціоновані викиди, що значно перевищують регулюючі норми. В такому разі навіть і за сприятливих для розсіювання метеорологічних умов рівень приземної концентрації токсичних речовин буде перевищувати ГДК, що й спричинить НС.

За умов аварійного режиму роботи АЕС здійснюються зазвичай потужні нерегульовані викиди в атмосферу, завдяки чому рівні концентрацій ЗР поблизу земної поверхні на певній відстані від джерела викиду будуть значно перевищувати відповідні ГДК. Така ситуація також є надзвичайною, на яку потрібно вчасно та ефективно реагувати.

Описані випадки виникнення НС, зумовлених значним хімічним забрудненням АП, є одними з найбільш поширених і небезпечних. Ефективне попередження таких НС потребує детального вивчення фізичних особливостей розповсюдження небезпечних речовин в АП, про що йтиметься нижче.

Фактори, що впливають на розповсюдження домішок в атмосфері

Неперервний викид. Після того, як домішки потрапляють в повітря, характер їх переміщення визначається їх власними фізичними

властивостями й властивостями атмосфери, в яких вони знаходяться. Концептуальна поведінка ЗР, викинутих стаціонарним точковим антропогенним джерелом, показана на рис. 1 [8].

Основними факторами впливу на розповсюдження домішок в атмосфері є вітер та розподіл температури повітря з висотою.

Промислові викиди в атмосферу мають певну швидкість виходу з труб, а у разі перегріву газів щодо навколишнього повітря характеризуються плавучістю. Отже, в околицях джерела викиду створюється поле вертикальних швидкостей, затухаючих з віддаленням від джерела, що тягнеться іноді на великі відстані, та сприяє підйманню домішки вгору.

Процес перенесення домішок у верхні шари атмосфери визначається категорією стійкості (стабільності) атмосфери (стратифікацією атмосфери).

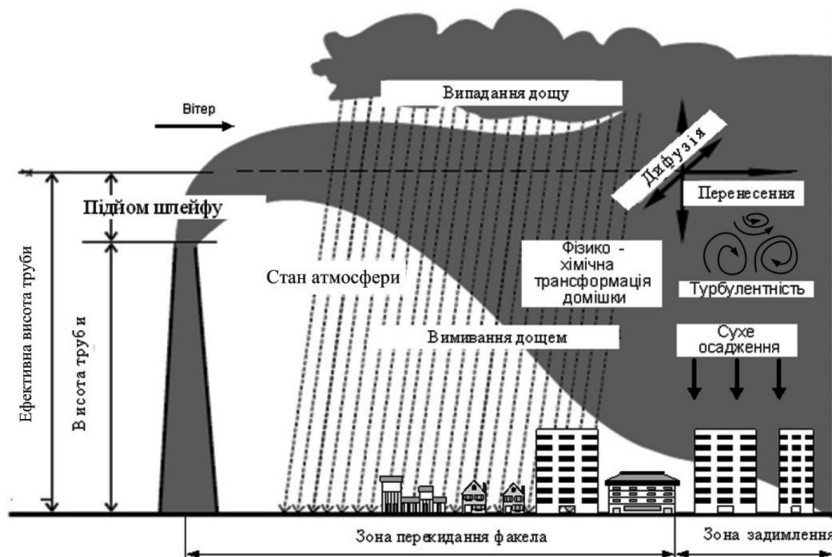
Стан атмосфери буває рівноважним, стійким і нестійким. Ступінь стійкості атмосфери визначає поведінку повітряної частинки (елементарний об'єм повітря), виведеної з первинного положення, у вище або нижче розташований шар атмосфери.

Частинка теплого повітря підіймається вгору, холодного — опускається вниз. Зазвичай в атмосфері відбувається зниження температури з висотою. Якщо градієнт температури в сухій атмосфері дорівнює $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ на 100 м , то повітря на будь-якій висоті знаходиться в рівновазі. Кожна повітряна частинка, що переміщується вгору або вниз, приймає температуру навколишнього повітря та її густина стає рівній густині оточуючих її частинок, отже, немає причин до її підймання або опускання. У такому разі говорять, що атмосфера знаходиться в стані байдужої рівноваги або, що спостерігається рівноважна стратифікація. Зазвичай в умовах вологого повітря рівноважний стан спостерігається при меншому градієнті температури (приблизно $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$).

Якщо вертикальний градієнт температури в атмосфері менше, ніж при рівновазі, то частинка, що переміщується вгору, буде охолоджуватися і скоро стане холоднішою, ніж навколишнє повітря, і важчою за нього. Тому вона опуститься і знову займе своє первинне положення. В цьому випадку атмосфера знаходиться в стані стійкої рівноваги, тобто спостерігається стійка стратифікація атмосфери.

Якщо вертикальний градієнт температури більше рівноважного, то повітряна частинка,

Рис. 1. Особливості розповсюдження ЗР в атмосфері внаслідок викиду техногенного джерела



почавши рухатися вгору або вниз, продовжуватиме свій рух зі все зростаючим прискоренням. Чим далі вона йде від первинного положення, тим більше її температура відхиляється від температури навколишнього повітря. У такому разі говорять про нестійку стратифікацію [12].

Зростання температури з висотою називається інверсією. Інверсія температури може спостерігатися як у поверхні землі (приземна інверсія), так і на деякій висоті (висотна інверсія). Якщо інверсія зустрічається на певній висоті над землею, її називають підвищеною.

Наявність підвищеної інверсії над джерелом призводить до того, що викиди не можуть піднятися вище певного рівня — «стелі», що створює небезпечні умови для зростання концентрації забруднення біля земної поверхні. Згідно з [9], [13] висота «стелі» приблизно визначається за формулою (1):

$$z_{ст} = 0,61 \sqrt{\frac{W_0 R_0^2 \Delta T}{K_z \frac{\Delta T}{\Delta z}}}, \quad (1)$$

де K_z — коефіцієнт вертикального турбулентного обміну в атмосфері, $[m^2/c]$; Δz — інверсійний градієнт температури, $[^{\circ}C/m]$; w_0 — швидкість виходу ЗР з джерела, $[m/c]$; R_0 — радіус гирла джерела викиду, $[m]$.

Значне підвищення концентрації домішок в приземному шарі атмосфери (ПША) можливе також, коли при нададіабатичному градієнті температури нижче за джерело розташований

штильовий шар. Притому чим товще шар з ослабленою швидкістю вітру і чим нижче він розташований, тим сильніше його вплив.

Однак газова суміш, що викидається в атмосферу, має певну швидкість і через різницю температур суміші та навколишнього повітря — певну плавучість, внаслідок цього (за відсутності вітру) струмінь викиду по виходу з гирла свердловини протягом деякого часу продовжує рухатися в напрямку, заданому стовбуром свердловини, тобто вертикально вгору. І тільки тоді, коли такий спрямований рух струменя припиниться, почнеться процес дифузійного розсіювання. Іншими словами, в реальних умовах викиду існує ніби фіктивне джерело дифундуєчої в атмосфері домішки, яке підняте над гирлом на деяку висоту.

Вводиться поняття ефективної висоти джерела:

$$H_{ef} = H_{дж} + \Delta H, \quad (2)$$

де $H_{дж}$ — висота джерела викиду (факельна труба), (m) ; ΔH — величина підйому домішок над джерелом, (m) .

Формули для визначення ΔH для різних станів атмосфери можна знайти в [14].

Розповсюдження домішок в атмосфері відбувається через розсіювання внаслідок турбулентної дифузії та вітрового перенесення.

Вплив вітру призводить до того, що під час неперервного виходу домішки з джерела забруднення утворюється факел викиду. При слабкому вітрі або за його відсутності (штилі) дифузійне перенесення може превалювати над вітровим,

і тоді навколо джерела утвориться штильова хмара забруднення.

Вплив швидкості вітру на забруднення ПША має складний характер, оскільки з однієї сторони наземні концентрації домішок зменшуються із зростанням швидкості вітру, а з іншої — посилення вітру веде до зменшення початкового підйому ΔH домішок, що сприяє збільшенню наземної концентрації. У разі викиду перегрітих відносно зовнішнього повітря домішок існує певна небезпечна швидкість вітру, при якій спостерігається максимальна концентрація домішок. Значення цієї величини u_m (м/с) на рівні флюгера для джерела порівняно нагрітих викидів приблизно визначається за формулами [12]:

$$u_m = \begin{cases} 0,5 & \text{при } v_m \leq 0,5 \text{ м/с,} \\ v_m & \text{при } 0,5 < v_m \leq 2 \text{ м/с,} \\ v_m (1 + 0,12\sqrt{f}) & \text{при } v_m > 2 \text{ м/с,} \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{де } v_m = 0,65 \sqrt[3]{\frac{V\Delta T}{H_{дж}}}, V = \pi R_0^2 W_0, f = 2000 \cdot \frac{W_0^2 R_0}{H_{дж}^2 \Delta T}.$$

За умов викиду домішок, холодніших за зовнішнє повітря, підвищений рівень забруднення буде спостерігатися при слабких вітрах (0–1 м/с) внаслідок накопичення домішок в ПША. Отже, під час дослідження умов розсіювання домішок слід враховувати як повторюваність малих швидкостей вітру, так і повторюваність небезпечної швидкості вітру.

При вертикальному градієнті температури, значно більшому 1 °С/100 м, в ПША створюються нерегульовані рухи повітря — атмосферна турбулентність.

Турбулентна дифузія домішок у повітрі відбувається внаслідок впливу турбулентних вихорів на хмару викиду. Характер їх взаємодії істотно залежить від відносних розмірів вихорів та хмари. На рис. 2 зображені ідеалізовані схеми розсіювання, які якісно ілюструють цей процес. Пунктиром показана траєкторія центру хмари [15].

На рис. 2, а) зображена кругла хмара, яка знаходиться в полі турбулентних вихорів, розміри яких менше її діаметра. Хмара в цьому випадку збільшується, а концентрація домішок в ній зменшується. На рис. 2, б) показано взаємодію маленької хмари з великомасштабними вихорами. В такому разі результат впливу турбулентності зводиться до викривлення траєкторії хмари, без зміни концентрації

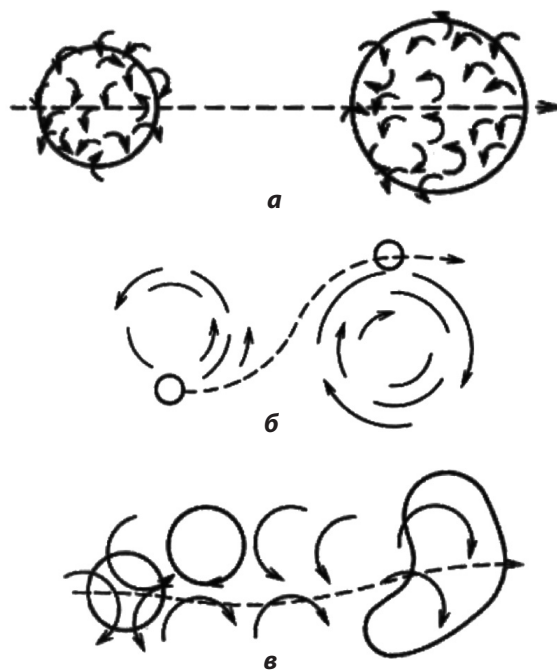


Рис. 2. Вплив турбулентності повітря на розсіювання домішок:

- а) — велика хмара в однорідному полі дрібних вихорів;
- б) — маленька хмара в полі великих вихорів;
- в) — хмара в полі вихорів, співрозмірних з його розмірами

домішок в ній. На рис. 2, в) показана хмара в полі вихорів, розміри яких співрозмірні з діаметром хмари. В цьому разі дифузія інтенсивна, концентрація домішки в хмарі швидко зменшується, а його форма помітно та випадковим чином викривляється, часто розпадаючись на окремі клуби.

Вища порівняно з навколишнім середовищем температура домішок, що викидаються з труб в атмосферу, змінює форму факела, скривляє його вісь і збільшує висоту, якої досягають викиди. Форма факела в напрямку вітру значною мірою залежить від структури турбулентності. За сильної нестійкості в прилеглому прошарку атмосфери переважають значні вихори, обумовлені вільною конвекцією. Оскільки розміри вихорів більші за діаметр факела, їх вплив здебільшого полягає в тому, що вони або піднімають, або опускають факел, надаючи його межах хвилеподібну форму. Ці збурення переміщуються разом із повітряним потоком, збільшуючись за амплітудою. За такого нестійкого переносу факел з домішками, що містяться в ньому, досягає підстильної поверхні недалеко від джерела, де миттєво виникає велика концентрація забруднення (рис. 3, а)). Після тривалої дії джерела внаслідок постійної зміни напрямку вітру згладжений розподіл

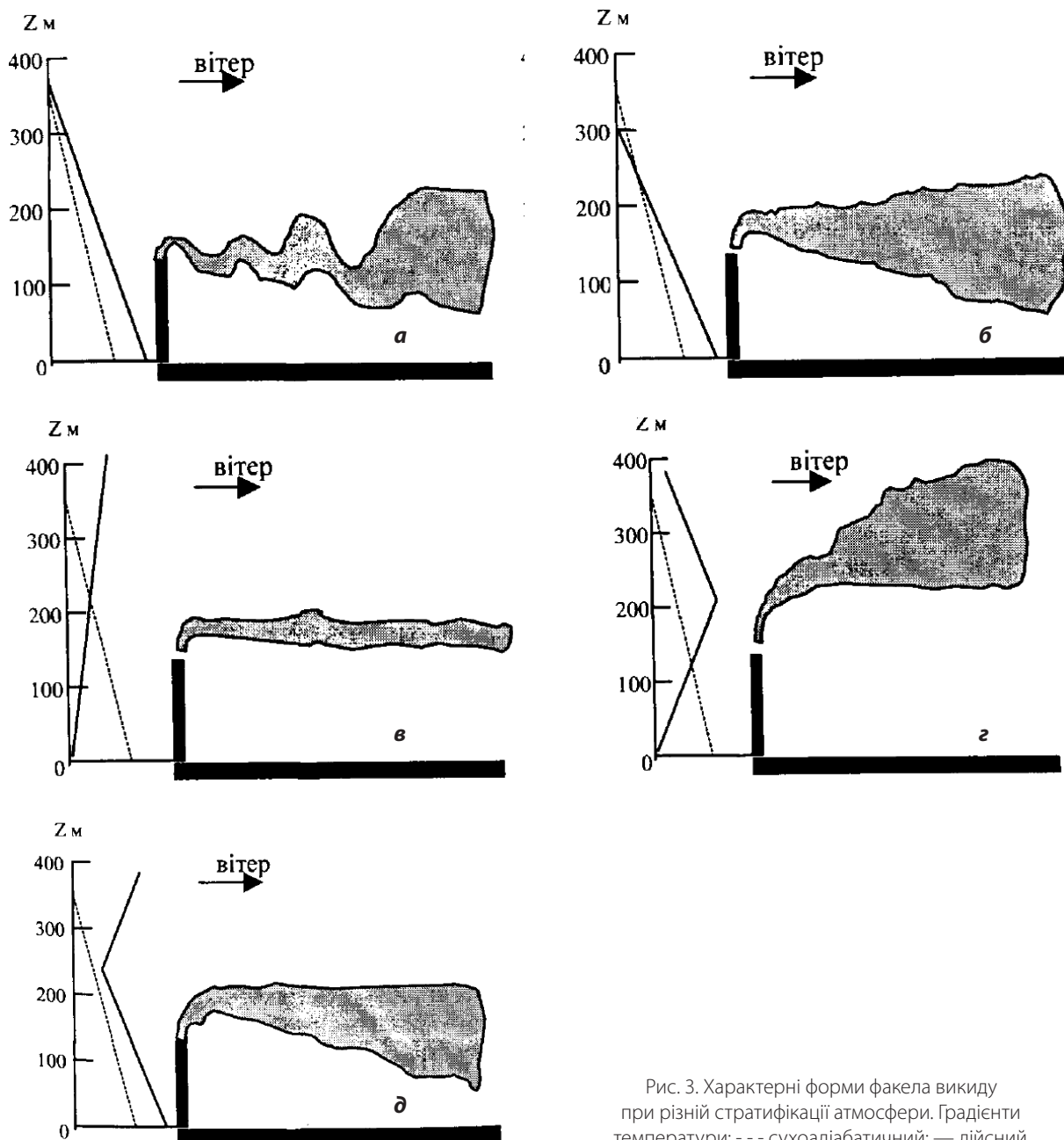


Рис. 3. Характерні форми факела викиду при різній стратифікації атмосфери. Градієнти температури: - - - сухоадіабатичний; — дійсний

концентрації домішок на підстильній поверхні набуває вигляду віяла.

У вітряну погоду в разі термічної стратифікації, близької до нейтральної, турбулентний обмін здійснюється переважно невеликими вихорами змушеної конвекції, що генеруються зсувом швидкості вітру. Тому розширення факела від піднятого джерела відбувається приблизно з однаковою інтенсивністю і по вертикалі, й по горизонталі, відтак він приймає форму конуса, симетричного до центральної вісі (рис. 3, б)). Оскільки діаметр конуса збільшується до низу за потоком тільки внаслідок турбулентної дифузії, а вертикальне

перенесення ослаблене нейтральною термічною стратифікацією, факел досягає підстильної поверхні на великих відстанях від джерела.

У разі стійкої атмосферної стратифікації турбулентність дуже ослаблена і будь-які висхідні потоки повітря, що зароджуються, активно придушуються. Через нерозвиненість вертикальної дифузії факел залишається тонким, а через нестійкість напрямку вітру він приймає V-подібну форму (нагадує віяло, якщо дивитися зверху). У разі сталого напрямку вітру факел має форму стрічки і може зберігатися таким без значних змін до відстаней приблизно 100 км від джерела (рис. 3, в)). Якщо на підвітряній

стороні немає значних змін рельєфу, концентрація домішок на підстилаючій поверхні на цій відстані практично дорівнює нулю, оскільки відсутній розвинений вертикальний переніс.

З погляду охорони довкілля найсприятливішою умовою для розсіювання домішок є розташування джерела над прошарком інверсії. Стійко стратифіковане повітря перешкоджає поширенню домішок у прошарки, що лежать нижче, а помірно нестійка стратифікація верхніх прошарків сприяє дифузії забруднення вгору (рис. 3, з)). Коли прошарок інверсії розташований над джерелом і перешкоджає поширенню домішки у верхні прошарки, трапляється протилежний ефект. Оскільки знизу повітря стратифіковано хитливо, то конвективне перемішування сприяє поширенню домішки до підстилаючої поверхні та підвищенню концентрації забруднення уздовж лінії, що відповідає осі факела (рис. 3, д) [8].

Також, на розповсюдження домішок в атмосфері і тим самим на рівень приземної концентрації впливають тумани, опади та сонячна радіація.

Під впливом туману забруднення повітря посилюється. Краплі туману поглинають шкідливі речовини як поблизу поверхні, так і з вищерозміщених забруднених шарів повітря. Внаслідок цього концентрація домішок сильно зростає в шарі туману і зменшується над ним.

Важливу роль в процесі самоочищення атмосфери виконують атмосферні опади. Краплі дощу або сніжинки захоплюють частинки пилу і несуть їх до поверхні землі. Чим більша кількість опадів, тим чистіше атмосфера. Проте, опади стають джерелом забруднення ґрунту та поверхневих водних об'єктів шкідливими речовинами.

Сонячна радіація обумовлює фотохімічні реакції в атмосфері з утворенням різних вторинних продуктів, які володіють часто більш токсичними властивостями, ніж речовини, які викидаються джерелами забруднення.

Також, під час розповсюдження домішки можуть зазнавати зміни фізичних властивостей унаслідок коагуляції — злиття частинок.

У реальній атмосфері викиди промислових підприємств піддаються дії всього комплексу метеорологічних чинників, який і визначає той або інший рівень забруднення. Поєднання метеорологічних умов, які сприяють накопиченню в атмосфері домішок, зазвичай називають метеорологічним потенціалом забруднення атмосфери, а поєднання факторів, що обумовлюють

розсіювання — розсіюючою здатністю атмосфери. Вплив різних складових потенціалу залежить від розташування джерел, параметрів викидів, а також від повторюваності його складових. Чим більше повторюваність несприятливих умов, тим частіше відбувається накопичення домішок і тим вищий середній рівень забруднення.

Повторюваність умов, сприятливих для розсіювання домішок, істотно змінюється протягом року і з року в рік. Залежно від виду джерел і характеру їх розташування по території міста мінливість концентрації домішки, яка обумовлена змінами метеорологічних умов, може бути дуже значною. Роль метеорологічних умов у формуванні середнього рівня забруднення іноді може перевищувати роль кількості та складу викидів [9].

Залповий викид. До числа практично важливих задач також належать дослідження розповсюдження ЗР в атмосфері під час їх залпового викиду. Залповий викид ЗР може спостерігатися як і за штатного режиму роботи техногенного об'єкта, так і під час аварійних ситуацій — пожеж і вибухів. Відмінною особливістю залпових викидів ЗР є їх децентралізованість і нестаціонарність процесу розповсюдження, коли за короткий проміжок часу в атмосферу викидаються великі кількості шкідливих речовин. Ці викиди наближаються з фізичного боку до викидів миттєвих джерел.

Унаслідок дії миттєвого джерела хмара пилогазової суміші піднімається на певну висоту. Рух повітря зумовлює як розсіювання, так і впорядковане її перенесення. Якщо атмосферні вихорі за розміром менші розмірів хмари, вони розсіюють домішку, якщо більші — переносять. Під дією вітру хмара розмивається (деформується) як в напрямку руху, так і в поперечному та вертикальному напрямках унаслідок турбулентного обміну. Напрямок вітру визначає траєкторію прямування, а швидкість вітру — швидкість переміщення хмари домішок від місця викиду. Вертикальний градієнт температури на рівні хмари є суттєвим, тому що нестійка стратифікація сприяє підйманню хмари, а інверсійна її затримує.

Також домішка в хмарі може піддаватися вимиванню опадами та фізичній і хімічній трансформації внаслідок контакту з вологою або іншими домішками в атмосфері.

Загалом аварійний викид може являти собою хаотичну суміш усіляких твердих, рідких і газоподібних речовин. Розміри твердих і рідких частинок у діаметрі можуть бути як менше 0,1 мкм, так і досягати декількох см. Оскільки маса частинок

з діаметром більше 10 мкм надто велика, вони швидко опадають після викиду в атмосферу, тому їх найбільше буває поблизу місця аварії. Частинки з діаметром менше за 1 мкм довше залишаються у зваженому стані, їх поширення більшою мірою залежить від метеорологічних умов, вони можуть залишатися у повітрі протягом декількох днів і переноситися вітром на значні відстані [8].

Висновки

За результатами виконаного дослідження встановлено, що найбільш визначальними факторами впливу на розподіл концентрації забруднюючих речовин в АП унаслідок викидів з радіаційно-небезпечного техногенного об'єкта є: режим та умови викиду, вид джерела (точкове, лінійне, площадкове), напрямок та швидкість вітру, стан атмосфери, хімічна взаємодія з іншими речовинами в АП, гравітаційне осадження, вимивання опадами, поглинання підстилаючою поверхнею, шорсткість підстилаючої поверхні, рельєф місцевості.

Встановлено, що рівень приземної концентрації забруднюючих речовин зростає у разі збільшення потужності джерела викиду, густини та розмірів частинок домішки та температури повітря, і спадає під час збільшення висоти та радіусу гирла джерела викиду, температури викиду, швидкості виходу домішок з джерела. Залежність концентрації забруднюючих домішок від швидкості вітру має нелінійний характер.

Отримані результати є першим етапом розробки інформаційно-технічних методів попередження НС, зумовлених хімічним забрудненням АП в ЗС АЕС, і будуть в подальшому використані для реалізації другого етапу — розробки математичних моделей розповсюдження забруднюючих домішок в АП від викидів АЕС під час відповідних НС.

Список використаних джерел

1. Wei, G., & Sheng, Z. (2019). Image Quality Assessment for Intelligent Emergency Application based on Deep Neural Network. *Journal of Visual Communication and Image Representation*. doi:10.1016/j.jvcir.2019.102581.
2. Wang, L., Wang, Y.-M., & Martínez, L. (2017). A group decision method based on prospect theory for emergency situations. *Information Sciences*, 418–419, 119–135. doi:10.1016/j.ins.2017.07.037.
3. Islam, M. S., Ahmed, M. M., & Islam, S. (2018). A Conceptual System Architecture for Countering

the Civilian Unmanned Aerial Vehicles Threat to Nuclear Facilities. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. Vol. 23. P. 139–149. doi:10.1016/j.ijcip.2018.10.003.

4. Pereira, M. N. A., Schirru, R., Gomes, K. J., & Cunha, J.L. (2017). Development of a mobile dose prediction system based on artificial neural networks for NPP emergencies with radioactive material releases. *Annals of Nuclear Energy*. Vol. 105, P. 219–225. doi:10.1016/j.anucene.2017.03.017.

5. Попов О. О., Яцишин А. В., Ковач В. О., Артемчук В. А., Тарадуда Д. В., Собина В. А., Соколов Д. Л., Демент М. А., Яцишин Т. М., Матвеева І. В. Аналіз можливих причин виникнення надзвичайних ситуацій на АЕС з метою мінімізації ризику їх виникнення. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2019. № 1(81). С. 75—80. doi: 10.32918/nrs.2019.1(81).13.

6. Гончаренко Ю. Ю., Дивизинюк М. М., Коноваленко Н. В., Лазаренко С. В. Разработка основ учета влияния среды и рельефа на дальность обнаружения радиолокационных целей. *Зв'язок*, 2016, № 6, с. 34–39.

7. Zaporozhets A. O., Eremenko V. S., Serhiienko R. V., Ivanov S.A. Development of an intelligent system for diagnosing the technical condition of the heat power equipment. *XIII International Scientific and Technical Conference "Computer Sciences and Information Technologies" (CSIT 2018)* (11–14 September 2018, Lviv, Ukraine). P. 48–51. doi: 10.1109/STC-CSIT.2018.8526742.

8. Popov O., Yatsyshyn A. Mathematical tools to assess soil contamination by deposition of technogenic emissions. *Soil Science Working for a Living*. Cham. Springer. 2017. P. 127–137. doi:10.1007/978-3-319-45417-7_11.

9. Шкица Л. Е., Яцишин Т. М., Попов А. А., Артемчук В. А. Прогнозирование распространения загрязняющих веществ в атмосфере на территории буровой установки. *Нефтяное хозяйство*. 2013. № 11. С.136–140.

10. Попов О. О., Яцишин А. В., Ковач В. О., Артемчук В. А., Тарадуда Д. В., Собина В. А., Соколов Д. Л., Демент М. А., Яцишин Т. М. Концептуальні підходи створення інформаційно-аналітичної експертної системи для оцінки впливу АЕС на довкілля. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2018. № 3(79). С. 56—65. doi:10.32918/nrs.2018.3(79).09.

11. Zaporozhets A. O., Redko O. O., Babak V. P., Eremenko V. S., Mokiychuk V. M. Method of indirect measurement of oxygen concentration in the air. *Naukovi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2018. № 5. P. 105–114. doi:10.29202/nvngu/2018-5/14.

12. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 448 с.

13. Атмосфера: справочник. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 510 с.

14. Федотов А. В. Анализ методов оценки и мониторинга эколого-экономических последствий чрезвычайных ситуаций. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2008. № 5. С. 194–198.

15. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика. Теория турбулентности. СПб: Гидрометеоздат, 1992. Т. 1. 694 с.

References

1. Wei, G.; Sheng, Z. (2019). "Image Quality Assessment for Intelligent Emergency Application based on Deep Neural Network". *Journal of Visual Communication and Image Representation*. doi:10.1016/j.jvcir.2019.102581.

2. Wang, L.; Wang, Y.-M.; Martínez, L. (2017). "A group decision method based on prospect theory for

emergency situations". *Information Sciences*. 418–419, 119–135. doi:10.1016/j.ins.2017.07.037.

3. Islam, M. S.; Ahmed, M. M.; Islam, S. (2018). "A Conceptual System Architecture for Countering the Civilian Unmanned Aerial Vehicles Threat to Nuclear Facilities". *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. Vol. 23. P. 139–149. doi:10.1016/j.ijcip.2018.10.003.

4. Pereira, M.N.A.; Schirru, R.; Gomes, K.J.; Cunha, J.L. (2017). "Development of a mobile dose prediction system based on artificial neural networks for NPP emergencies with radioactive material releases". *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 105, P. 219–225. doi:10.1016/j.anucene.2017.03.017.

5. Popov, O.; Iatsyshyn A.; Kovach, V.; Artemchuk, V.; Taraduda, D.; Sobyna, V.; Sokolov, D.; Dement, M.; Yatsyshyn, T.; Matvieieva, I. (2019). "Analysis of Possible Causes of NPP Emergencies to Minimize Risk of Their Occurrence" [Analiz mozhlivykh prychnyn vynyknennya nadzvychaynykh sytuatsiy na AES z metoyu minimizatsiyi ryzyku yikh vynyknennya]. *Nuclear and Radiation Safety*. Iss. 1 (81), pp. 75–80. doi: 10.32918/nrs.2019.1(81).13 (Ukr)

6. Goncharenko, Yu.; Divizinyuk M.; Konovalenko N.; Lazarenko S. (2016) "Development Of Influences Bases Of The Environment And Terrain At A Distance Of Detection Of Radar Targets" [Razrabotka osnov ucheta vliyaniya sredey i rel'yefa na dal'nost' obnaruzheniya radiolokatsionnykh tseley]. *Zvyazok*, № 6, pp. 34–39 (Rus)

7. Zaporozhets, A.O.; Eremenko, V.S.; Serhiienko, R.V.; Ivanov, S.A. (2018) "Development of an intelligent system for diagnosing the technical condition of the heat power equipment". *XIII International Scientific and Technical Conference "Computer Sciences and Information Technologies"* (CSIT 2018) (11–14 September 2018, Lviv, Ukraine). P. 48–51. doi: 10.1109/STC-CSIT.2018.8526742.

8. Popov, O.; Yatsyshyn, A. (2017). "Mathematical tools to assess soil contamination by deposition of technogenic emissions". *Soil Science Working for a Living*. Cham. Springer. pp. 127–137. doi:10.1007/978-3-319-45417-7_11.

9. Shkitsa, L.E.; Yatsyshyn, T.M.; Popov, A.A.; Artemchuk, V.A. (2013). "The development of mathematical tools for ecological safe of atmosphere on the drilling well area" [Prognozirovaniye rasprostraneniya zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosfere na territorii burovoy ustanovki]. *Neftyanoe khozyaystvo — Oil Industry*. Iss. 11, pp. 136–140. (Rus)

10. Popov, O.; Iatsyshyn, A.; Kovach V.; Artemchuk V.; Taraduda D.; Sobyna V.; Sokolov D.; Dement M.; Yatsyshyn T. (2018). "Conceptual Approaches for Development of Informational and Analytical Expert System for Assessing the NPP impact on the Environment" [Kontseptual'ni pidkhody stvorenniya informatsiyno-analitychnoyi ekspertnoyi systemy dlya otsinky vplyvu AES na dovkillya]. *Nuclear and Radiation Safety*. Iss. 3(79), pp. 56–54. doi:10.32918/nrs.2018.3(79).09 (Ukr)

11. Zaporozhets, A.O.; Redko, O.O.; Babak, V.P.; Eremenko, V.S.; Mokyichuk V.M. (2018). "Method of indirect measurement of oxygen concentration in the air". *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. № 5. P. 105–114. doi:10.29202/nvngu/2018-5/14.

12. Berland, M. (1975) "Modern problems of atmospheric diffusion and air pollution" [Sovremennyye problemy atmosferynoy diffuzii i zagryazneniya atmosfery], Leningrad, Gidrometeoizdat, P. 448. (Rus)

13. (1991) "Atmosphere: Handbook" [Atmosfera : spravochnik], Leningrad, Gidrometeoizdat, P. 510. (Rus)

14. Fedotov, A.V. (2008) "Analysis of methods for assessing and monitoring the environmental and economic

consequences of emergency situations" [Analiz metodov otsenki i monitoringa ekologo-ekonomicheskikh posledstviy chrezvychaynykh situatsiy]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. № 5. P. 194–198. (Rus)

15. Monin, A.S.; Yaglom, A.M. (1992) "Statistical hydro-mechanics. Theory of Turbulence" [Statisticheskaya gidromekhanika. Teoriya turbulentnosti], St. Petersburg: Gidrometeoizdat, T. 1. P. 694. (Rus)

Physical Features of Pollutants Spread in the Air During the Emergency at NPPs

Popov O¹, Iatsyshyn A¹, Kovach V², Artemchuk V³, Taraduda D⁴, Sobyna V⁴, Sokolov D⁴, Dement M⁴, Hurkovskiy V⁵, Nikolaiev K², Yatsyshyn T⁶, Dimitriieva D.⁷

¹SI «Institute of Environment Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine», Kiev, Ukraine

²National Aviation University, Kiev, Ukraine

³Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine

⁴National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkov, Ukraine

⁵Center for Research on Public Administration Problems, Kiev, Ukraine

⁶Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

⁷State Enterprise "State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety", Kiev, Ukraine

The authors carried out a thorough study of the features of the spread of hazardous chemicals in the surface layer of the atmosphere in the event of an emergency at the site of a nuclear power plant. In order to ensure the continuous operation of the stations in their territories, various ancillary technogenic facilities are located and operate, which release emissions of non-radiation pollutants into the atmosphere. Under various negative circumstances of a technical and natural nature, emergencies may occur due to significant chemical pollution of the atmospheric air in and outside the sanitary protection zone. The prevention of such emergencies is based on environmental monitoring in the locations of man-made objects and their preventive forecast. Implementation of these measures is not possible without the use of effective methods based on mathematical models of environmental pollution by anthropogenic objects, and the hardware and software that implement these methods. The main stages of the development of information and technical methods

of prevention of such emergencies are given and described. Different scenarios of emergencies are described as a result of the release of chemicals into the atmosphere at these sites. A conceptual scheme for the distribution of impurities in the atmosphere due to man-made emissions has been developed. The peculiarities of atmospheric air propagation under stationary and non-stationary emission conditions are described in detail. It is established that the most determinants of influence on the concentration distribution of impurities are: mode and conditions of emission, type of source, direction, and velocity of the wind, state of the atmosphere, chemical interaction with other substances

in the atmospheric air, gravitational deposition, leaching of sediments, absorption of the underlying surface, terrain. The results obtained will be used in the process of developing mathematical models for the propagation of pollutants in the atmospheric air from the emissions of nuclear power plants during relevant emergencies.

Key words: nuclear power plant, emergency situation, emissions of pollutants, physical features of the spread.

Отримано????????????????????