УДК 614.8-052 **DOI: 10.33042/2522-1809-2024-6-187-278-283**

А.С. Лесько

Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси, Україна

ІНТЕНСИВНІСТЬ ХІМІЧНОЇ НЕЙТРАЛІЗАЦІЇ ХЛОРУ ПРИ ОСАДЖЕННІ ДРІБНОДИСПЕРСНИМ РІДИННИМ ПОТОКОМ

Розроблено модель сорбції газоподібного хлору з атмосфери дрібнодисперсним рідинним потоком. Модель дозволяє враховувати коефіцієнт акомодації хлору, коефіцієнт його дифузії в об'ємі краплі та швидкість хімічної реакції хлору з нейтралізаторами. Визначені параметри кінетики нейтралізації хлору із сьома різними добавками до води та на основі аналізу цих параметрів визначено найбільш ефективний нейтралізатор.

Ключові слова: *дрібнодисперсний потік, надзвичайна ситуація, осадження, сорбція, хімічна нейтралізація. Хлор.*

Постановка проблеми

Одними з основних завдань єдиної державної системи цивільного захисту [1] є прогнозування і оцінка соціально-економічних наслідків надзвичайних ситуацій (НС), визначення на основі прогнозу потреби в силах, засобах, матеріальних та фінансових ресурсах; проведення рятувальних та інших невідкладних робіт щодо ліквідації наслідків НС, організація життєзабезпечення постраждалого населення.

Особлива увага має приділятися ліквідації аварій на хімічно небезпечних об'єктах (ХНО). Хімічні речовини, що обертаються, звичайно є або токсичними або вибухонебезпечними. Внаслідок аварії може статися викид небезпечних хімічних речовин (НХР) в атмосферу, воду, грунт, що призведе до їх забруднення та виникненню загрози здоров'ю людей, які проживають поблизу. Аварії на ХНО можуть спричинити негативні екологічні наслідки, а саме загибель рослин, тварин, забруднення водних ресурсів, забруднення природних екосистем.

Основним завданням при ліквідації аварій на ХНО є локалізація аварії, зупинка подальшого розповсюдження НХР та запобігання їх потрапляння в оточуюче середовище. Ліквідація джерела аварії передбачає усунення витоку НХР з пошкодженого обладнання.

Одним з методів ліквідації аварій з викидом небезпечних газів на ХНО є осадження газової хмари, зокрема, водою. Це дозволяє швидко зменшити концентрацію небезпечного газу, що зменшує ризик отруєння. Додатковим може бути ефект нейтралізації небезпечних властивостей газу. Наприклад хлор реагує з водою, утворюючи соляну кислоту та хлороватисту кислоту. За своєю хімічною активністю соляна кислота належить до найсильніших кислот, але її властивості суттєво залежать від її концентрації у водному розчині. Хлороватиста кислота за своєю хімічною активністю є слабкою [2]. Вода утворює бар'єр, що перешкоджає подальшому поширенню хлору в атмосферу, знижуючи ризик отруєння людей й зараження навколишнього середовища.

На сьогодні створений математичний апарат для прогнозування процесу осадження небезпечних газів, але вони спрямовані, перш за все, на гази, що є легшими за повітря.

Таким чином, існує проблема низької точності прогнозування наслідків НС із викидом НХР хлор при його інтенсивному осадженні стаціонарними установками або рятувальними підрозділами оперативно-рятувальної служби цивільного захисту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аварії на ХНО, звичайно супроводжуються розгерметизацією ємностей, в яких знаходяться НХР, що призводить до появи зони ураження відповідних розмірів.

28 лютого 2019 року стався витік хлору на підприємстві Birmingham Water Works (м. Бирмингем, штат Алабама, США) [3]. Постраждали понад 50 осіб. Причиною витоку є ненавмасне змішування двох речовин: гіпохлориту натрію і сульфату заліза.

01 грудня 2021 року на території підприємства «Південьвійськбуд» (м. Одеса) стався витік хлору внаслідок розгерметизації ємності об'ємом 800 літрів [4]. В зоні аварії гранично допустимі концентрації хлору було значно перевищено. Виток було припинено, нейтралізація місця розливу проведена шляхом осадження хлору розчином соди у воді.

24 лютого 2022 року розпочався відкритий воєнний напад Російської Федерації на Україну.

 © Лесько А.С.

Можливість появи аварій на ХНО з викидом НХР, зокрема хлором, значно збільшилася.

Звичайно при оцінюванні розміру зони хімічного забруднення враховуються три блоки факторів [5]: зовнішні метеорологічні (температура повітря, вологість повітря, швидкість вітру, напрямок вітру, атмосферний тиск); властивості НХР (найменування, від, агрегатний стан, фізико-хімічні властивості, умови зберігання, інтенсивність витоку); параметри осадження НХР (найменування речовини, що використовується для осадження, вид, агрегатний стан, фізико-хімічні властивості, інтенсивність подачі, площа осадження).

Швидкість ліквідації аварії залежить від управлінських рішень керівника ліквідації НС на ХНО, вплив на які оказує точність прогнозування її розвитку.

Більшість відомих математичних моделей розповсюдження НХР базуються на розв'язанні рівнянь Гауса. Однією з найбільш відомих є модель, що використовується Міжнародним агентством з атомної енергії (МАГАТЕ) [6]. За допомогою моделі здійснюється швидка оцінка наслідків аварій з радіоактивним забрудненням [7]. Суттєвим недоліком моделі є необхідність введення значної кількості вхідної інформації про розвиток НС, що утруднено забезпечити в реальних умовах ліквідації НС, та складність розрахунку.

В роботі [8] проведено прогнозування наслідків забруднення атмосфери НХР за допомогою розрахунку динаміки розвитку аварії.

Широко розповсюдженими є спрощені експрес-методи прогнозування, наприклад [9]. Це дозволяє значно спростити процедуру розрахунку та збільшити швидкість прогнозування. Недоліком є, що очікувано, мала точність прогнозування.

В роботі [10] при побудові моделі проводиться обробка великого масиву вихідної інформації про НС. Недоліком є залежність точності прогнозування від кількості та точності вихідних даних, збір яких є утрудненим в реальних умовах розвитку НС.

В роботі [11] розроблена методика прогнозування наслідків НС з викидом небезпечних газів при їх активному рідинному осадженні й проведена перевірка її працездатності. Недоліком є обмеження її працездатності газами, які є легшими за повітря.

Таким чином, актуальною та важливою науковою задачею є встановлення закономірностей інтенсивності осадження хлору дрібнодисперсним потоком із нейтралізуючими добавками.

Мета та завдання дослідження

Метою роботи є розробка математичних моделей інтенсивності хімічної нейтралізації хлору при його викиді в атмосферу.

Досягнення поставленої мети потребує вирішення наступних завдань:

1) розробити математичну модель сорбції хлору дрібнодисперсним рідинним потоком;

2) перевірити працездатність розробленої математичної моделі в залежності від інтенсивності подання дрібнодисперсного рідинного потоку.

Виклад основного матеріалу

Модель сорбції хлору дрібнодисперсним потоком. Масообміні процеси газу на поверхні рідини складаються із послідовності різних етапів (рис. 1).

Умовно процес сорбції хлору дисперсним потоком можна розділити на такі елементарні етапи:

1. Процес дифузії газоподібного хлору у повітрі до поверхні краплі.
2. Акомодація молекул газу на поверхні краплини;
3. Насичення абсорбованим газом поверхневого шару краплі.
4. Відведення абсорбованого газу із поверхневого шару у об'єм краплі за рахунок внутрішньої дифузії.

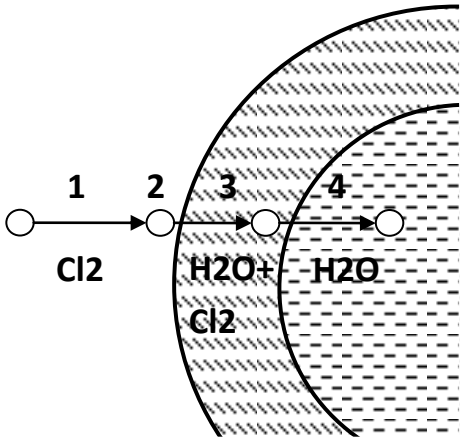

Рис. 1. Схема процесу абсорбції хлору краплею рідинного потоку

Кожен з етапів має свою фізико-хімічну кінетику та окремий комплекс визначальних факторів. Тому поєднання всіх етапів для опису загальною математичною моделлю викликає ряд складнощів, які впливають як на точність моделювання так і на здатність отриманої моделі до модернізації під певні умови. Виходячи з цього в даній роботі пропонується розглянути саме поетапну модель сорбції хлору краплею рідини. В якості рідини осадження розглядається вода та водні розчини нейтралізаторів, хімічні властивості яких будуть розглянуті нижче.

1. Процес дифузії газоподібного хлору у повітрі до поверхні краплі.

Коефіцієнт дифузії хлору за певних умов D_g визначається із співвідношення:

$$D_g = D_0 \cdot \frac{P_0}{P} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,75}, \quad (1)$$

де D_0 – коефіцієнт дифузії хлору за стандартних умов ($P_0 = 10^5$ Па; $T_0 = 273$ К); P, T – тиск та температура реальних умов атмосфери для яких проводиться розрахунок.

Використовуючи коефіцієнт дифузії хлору за формулою Смолуховського-Ейнштейна можна визначити частоту зіткнень молекул газу з краплею довільного розміру:

$$k_{coll} = 4\pi \cdot \left(R_g + R_{drop}\right) \cdot \left(D_g + D_{drop}\right), \quad (2)$$

де R_g, D_g – радіус молекулі та коефіцієнт дифузії хлору; R_{drop}, D_{drop} – радіус та коефіцієнт дифузії краплини дрібнодисперсного потоку.

Звернемо увагу, що в даній статті розглядається процес осадженні хлору рятувальними підрозділами із застосуванням штатного пожежно-технічного обладнання. Існуюче на сьогодні обладнання дозволяє отримати дрібнодисперсний потік із середнім радіусом краплі не нижче $R_{drop} \approx 0,5$ мм. Відповідно $R_g << R_{drop}$, $D_g >> D_{drop}$, що із (2) дозволяє отримати

$$k_{coll} = 4\pi \cdot R_{drop} \cdot D_g . \quad (3)$$

Приймаючи до уваги (1) та (3) та використовуючи параметри концентрації хлору в атмосфері C_g та концентрації крапель, що утворюються розпилювачем при осадженні C_{drop} отримаємо рівняння частоти зіткнень молекул хлору з поверхнею краплі:

$$I_{coll} = k_{coll} \cdot C_{drop} \cdot C_g . \quad (4)$$

Звичайно в реальних умовах існують ламінарні та турбулентні потоки газу з різними концентраціями а краплі дисперсного рідинного потоку можуть зіткатися одна з одною та коагулювати. Однак для умов моделювання процесу НС ці параметри можна брати квазістаціонарними в межах умовного одиничного об'єму.

2. Наступним етапом сорбції є проникнення молекул хлору крізь поверхневий шар молекул води у краплі. Не всім молекулам, що стикаються із поверхнею води за рівнянням (4) достатньо кінетичної енергії для подолання енергії відштовхування від молекул води у поверхневому шарі. В роботі [12] запропонована енергетична модель розрахунку коефіцієнту масової акомодації:

$$\alpha = 1 - \int_{E_{g-d}}^{E_{d-d}} f(E_g, T_g) dE_g , \quad (5)$$

де E_g, T_g – енергія та температури молекул газу; E_{d-d}, E_{g-d} – енергія міжмолекулярного зв'язку між молекулами води та води та газу відповідно.

При зіткненні із краплею молекули газу з кінетичною енергією, більшу енергію зв'язку молекул води на поверхні краплі ($E_g > E_{d-d}$), розривають зв'язок H_2O-H_2O та проникають в поверхневий шар краплі. У випадку $E_g < E_{d-d}$ поверхневий молекулярний шар не руйнується та при швидкостях зіткнення, що відповідають швидкості польоту вільної молекули газу, рідина поводиться як нестислива та абсолютно пружна. Оскільки маса краплі набагато більше маси молекули газу ($m_g << m_d$), то молекула газу після зіткнення відскакує з тією ж енергією, що й була до зіткнення. Однак при відстанях менше радіуса Дебая між поверхневими молекулами краплі та молекулою газу діють сили хімічної взаємодії E_{g-d}, які притягують молекулу газу до поверхні. За умови $E_g \le E_{g-d}$ молекула газу адсорбується на поверхні краплі. В роботах [13, 14] наведені результати розрахунків коефіцієнтів акомодації для деяких небезпечних газів.

3. Після захвату молекул хлору поверхнею краплі за рахунок між молекулярної взаємодії, молекули газу проникають у приграничний поверхневий шар. Інтенсивність насичення приграничного шару краплі молекулами абсорбованого газу можна оцінити використовуючи рівняння Генрі. Звичайно окрім тиску середовища, в якому протікає процес сорбції важливим є його температура та коефіцієнт поверхневого натягу краплини води. Відповідно коефіцієнт насичення поверхневого шару води абсорбованим газом можна записати у вигляді:

$$\theta_{sorb} = \frac{R_0 \cdot T}{\sigma} \cdot H \cdot P \cdot \tau , \quad (6)$$

де R_0 – універсальна газова стала; σ – коефіцієнт поверхневого натягу абсорбенту; H – постійна Генрі; τ – характерний час процесу.

Як видно з рівняння (6) окрім параметрів навколишнього середовища визначальним параметром є постійна Генрі. Для аналізу порівняємо цей показник для хлору з іншими газами (табл. 1).

З таблиці 1 видно, що якщо коефіцієнт дифузії

для всіх приведених газів має близькі значення та розходиться в діапазоні 1-25% з хлором то константа Генрі у порівнянні з таким поширеним небезпечним газом як аміак майже у 300 разів менша. Відповідно за однакових умов і інтенсивність сорбції буде пропорціональна нижчою.

Таблиця 1

Деякі фізико-хімічні властивості забруднюючих газів, що впливають на процес абсорбції (T=273K, P=10^5 Па)

Газ	H·10^4 [15]*, моль·м$^{-3}$·Па$^{-1}$	D_g·10^4 [16], м^2·с$^{-1}$	Реакція газу з водою
Cl_2	9,3	0,124	$Cl_2 + H_2O \rightleftarrows H^+ + Cl^- + HClO$
SO_2	150	0,122	$SO_2 + H_2O \rightleftarrows H_2SO_3$, $H_2SO_3 \rightleftarrows HSO_3^- + H^+$
NH_3	2700	0,198	$NH_3 + n \cdot H_2O \rightleftarrows NH_3 \cdot nH_2O$
HCN	750	0,136	$HCN + 2H_2O \rightarrow NH_4^+ + HCOO^-$
$COCl_2$	1100	0,121	$COCl_2 + n \cdot H_2O \rightleftarrows COCl_2 \cdot nH_2O$
HCl	1900	0,130	$HCl + n \cdot H_2O \rightleftarrows HCl \cdot nH_2O$

* - дані дещо відрізняються в різних джерелах залежно від методу визначення

4. Наступним етапом сорбціє є дифузії поглиненого у пригро нічному шарі газу у весь об'єм краплі. Інтенсивність цього процесу визначається коефіцієнтом дифузії газу в рідині D_{drop}. Враховуючи рівняння (4), (6) та коефіцієнт акомодації α загальна швидкість абсорбції газу визначається як:

$$V_{sorb} = I_{coll} \cdot \theta_{sorb} \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{D_{drop}}{\pi \tau}}. \qquad (7)$$

Розрахунки швидкості абсорбції наведених у таблиці 1 газів приведені на рис. 2. Чисельно моделювання проводилось у вигляді залежності інтенсивності абсорбції від інтенсивності подачі розпиленої води. Параметри розпилення та інтенсивності подачі брались відповідно до технічних характеристик пожежних стволів PROTEX, які штатно використовуються рятувальними підрозділами для осадження небезпечних газів з атмосфери при їх викиді під час НС. Дисперсність водяного потоку 1 мкм, максимальна інтенсивність подачі 2 л(с·м^2).

Обговорення результатів математичного моделювання сорбції хлору дрібнодисперсним рідинним потоком. При розробці моделей сорбції (4)-(7) використовувались загальні уявлення про фізико-хімічні та масообміні процеси. Це має свої переваги та недоліки. До переваг запропонованого підходу відноситься простота розрахунку та можливість відокремлення визначальних параметрів, на які слід впливати для підвищення інтенсивності абсорбції небезпечних газів. З аналізу моделі (4)-(7) до таких параметрів можна віднести інтенсивність подачі дисперсного потоку, або концентрацію крапель у одиниці об'єму C_{drop}, коефіцієнт поверхневого натягу абсорбенту σ та постійна Генрі H. Відповідно окрім тактико-технічних заходів по збільшенню інтенсивності потоку, який подають рятувальники для осадження хмари небезпечного газу, ефективним шляхом є і модифікація фізико-хімічних властивостей води, що подається на осадження. До таких способів відноситься додавання поверхнево-активних речовин для зниження поверхневого натягу та додавання спеціальних розчинних нейтралізаторів, які здатні до активної хімічної реакції з хлором. Це є особливо актуальним беручи до уваги данні таблиці 1, які демонструють суттєвий розрив по константі Генрі у хлору у порівнянні з іншими газами.

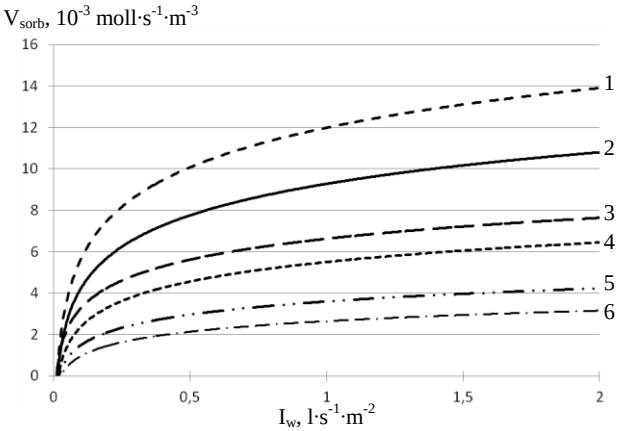

Рис. 2. Залежність інтенсивності осадження небезпечних газів (V_{sorb}) від інтенсивності подачі дисперсного потоку (I_W): 1 - NH_3; 2 - HCl; 3 - $COCl_2$; 4 - HCN; 5 - SO_2; 6 - Cl_2.

Звичайно таке спрощення моделі (4)-(7) може призвести до втрати точності результатів чисельного моделювання. Це потребує додаткової експериментальної перевірки. Для збільшення точності моделювання процесів сорбції на сьогодні використовують методи молекулярної динаміки та Монте-Карло. Це методи добре себе зарекомендували, але мають два суттєві недоліки, які ускладнюють їх використання в умовах ліквідації НС – це значний час машинного розрахунку та необхідність введення великої кількості вихідних параметрів. Зрозуміло, що час отримання необхідної інформації в умовах аварії відіграє критичне значення, також в таких умовах складно, а часто й неможливо отримати велику кількість необхідних вхідних параметрів із достатнім рівне точності. Це практично нівелює існуючи переваги методів молекулярної динаміки.

Аналіз рис. 2 показує, що дуже погана розчинність хлору у воді не дає значущої ефективності (6% у порівнянні з аміаком) його осадження дисперсними потоками навіть при максимальній інтенсивності, що підвереджує необхідність використання рятувальними підрозділами водорозчинних добавок, хімічно активних до реакції з хлором.

Також слід відмітити логарифмічний характер залежності інтенсивності осадження газу від інтенсивності подачі дисперсного потоку. Це може пояснюватись тим, що інтенсивність сорбції падає за рахунок зниження концентрації газу, яка в своє чергу падає саме за рахунок протікання процесу абсорбції. Тому аналізуючи рис. 2 можна визначити критичну інтенсивність подачі рідинного дисперсного потоку при якій інтенсивність сорбції майже стабілізується. Для хлору $I_{кр}$ = 1,57 л(с·м^2).

Висновки

В статті модифікована модель сорбції хлору дрібнодисперсним рідинним потоком. Розроблена математична модель дозволяє врахувати такі основні параметри сорбції, параметри навколишнього середовища, параметри рідинного потоку, що подається на осадження та фізико-хімічні властивості рідини у цьому потоці. Розроблена модель дозволяє мінімізувати кількість вхідних параметрів та час прогнозування, що є критично важливим для умов ліквідації НС. Результати чисельного моделювання показали, що при осадженні хлору, який є низкорочинним газом у воді визначальним є саме константа Генрі, а не інтенсивність подачі рідинного потоку, як вважалось раніше. Це підтверджує нагальну потребу у використанні оперативно-рятувальними підрозділами хімічних нейтралізаторів при ліквідації аварій із викидом хлору в атмосферу.

Література

1. Кодекс цивільного захисту України: Кодекс від 02.10.2012 № 5403-VI. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text (дата звернення 11.11.2024).
2. Chlorine. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Chlorine (дата звернення 11.11.2024).
3. Toxic gas at Birmingham water treatment plant sends 55 workers to hospitals. URL: https://www.al.com/news/birmingham/2019/02/multiple-ambulances-called-in-hazmat-incident-at-birmingham-water-treatment-plant.html (дата звернення 11.11.2024).
4. В Одесі стався витік хлору. URL: https://ua.korrespondent.net/ city/odessa/4422628-v-odesi-stavsia-vytik-khloru (дата звернення 11.11.2024).
5. Talhofer V., Hošková-Mayerová Š. Method of Selecting a Decontamination Site Deployment for Chemical Accident Consequences Elimination: Application of Multi-Criterial Analysis. ISPRS International Journal of Geo-Information. 2019. V. 8(4). P. 171. DOI: 10.3390/ijgi8040171.
6. Leelossy A., Molnar F., Izsak F., Havasi A., Lagzi I., Meszaros R. Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: a review. Central European Journal of Geosciences. 2014. № 6, P. 257-278. DOI: 10.2478/s13533-012-0188-6.
7. Hoinaski L., Franco D., Lisboa H. Comparison of plume lateral dispersion coefficients schemes: Effect of averaging time. Atmospheric Pollution Research. 2016. №7, P. 134-141. DOI: 10.1016/j.apr.2015.08.004.
8. Tatarinov V.V., Prus U.V., Kirsanov A.A. Decision support software for chemical accident elimination management. AIP Conference Proceedings. 2019. V. 2195. P. 020076. DOI: 10.1063/1.5140176.
9. Khan F., Rathnayaka S., Ahmed S. Methods and models in process safety and risk management: Past, present and future. Process Safety and Environmental Protection. 2015. V. 98. P. 116-147. DOI: 10.1016/j.psep.2015.07.005.
10. Martínez-García M., Zhang Y., Suzuki K., Zhang Y.D. Deep Recurrent Entropy Adaptive Model for System Reliability Monitoring. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2021. V. 17(2). P. 839-848. DOI: 10.1109/TII.2020.3007152.
11. Melnichenko A., Kustov M., Basmanov O., Tarasenko O., Bogatov O., Kravtsov M., Petrova O., Pidpala T., Karatieieva O., Shevchuk N. Devising a procedure to forecast the level of chemical damage to the atmosphere during active deposition of dangerous gases. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Volume 1 (10 (115)). P. 31–40. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.251675.
12. Кустов М.В., Калугін В.Д. Прогнозування інтенсивності осадження газоподібних токсичних хімічних речовин атмосферними опадами. East European Science Journal. 2016. Вип. 2(6). С. 52–59. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/ 123456789/4272. (дата звернення 11.11.2024).
13. Vieceli J., Roeselova M., Tobias D. J. Accommodation coefficients for water vapor at the air/water interface. Chemical Physics Letters. 2004. V. 393. Iss. 1-3. P. 249 – 255. DOI:10.1016/j.cplett.2004.06.038.
14. Davidovits P., Kolb C.E., Williams L.R. and other. Mass Accommodation and Chemical Reactions at Gas−Liquid Interfaces. Chemical Reviews. 2006. № 106 (4). P. 1323 – 1354. DOI:10.1021/cr040366k.
15. Sander R. Compilation of Henry's Law Constants for Inorganic and Organic Species of Potential Importance in Environmental Chemistry. Mainz: Max-Planck Institute of Chemistry. 1999. 107 p. URL: https://www.ready.noaa.gov /documents/TutorialX/files/Chem_henry.pdf (Last accessed: 11.11.2024).

16. Рамм В.М. Абсорбція газів. М.: Хімія. 1976. 656 с.

References

1. Kodeks tsyvilnoho zakhystu Ukrainy: Kodeks vid 02.10.2012 № 5403-VI. Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text.

2. Chlorine. In *Wikipedia*. Retrieved from https://en.wikipedia.org/ wiki/Chlorine.

3. Toxic gas at Birmingham water treatment plant sends 55 workers to hospitals. Retrieved from https://www.al.com/news/birmingham/2019/02/multiple-ambulances-called-in-hazmat-incident-at-birmingham-water-treatment-plant.html.

4. V Odesi stavsia vytik khloru. Retrieved from https://ua.korrespondent.net/city/odessa/4422628-v-odesi-stavsia-vytik-khloru.

5. Talhofer, V., Hošková-Mayerová, Š. (2019). Method of Selecting a Decontamination Site Deployment for Chemical Accident Consequences Elimination: Application of Multi-Criterial Analysis. *ISPRS International Journal of Geo-Information. 8(4).* 171.

6. Leelossy, A., Molnar, F., Izsak, F., Havasi, A., Lagzi, I., Meszaros, R. (2014). Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: a review. *Central European Journal of Geosciences. 6.* 257-278.

7. Hoinaski, L., Franco, D., Lisboa, H. (2016). Comparison of plume lateral dispersion coefficients schemes: Effect of averaging time. *Atmospheric Pollution Research. 7*. 134-141.

8. Tatarinov, V.V., Prus, U.V., Kirsanov, A.A. (2019). Decision support software for chemical accident elimination management. *AIP Conference Proceedings. 2195.* 020076.

9. Khan, F., Rathnayaka, S., Ahmed, S. (2015). Methods and models in process safety and risk management: Past, present and future. *Process Safety and Environmental Protection. 98.* 116-147.

10. Martínez-García, M., Zhang, Y., Suzuki, K., Zhang, Y.D. (2021). Deep Recurrent Entropy Adaptive Model for System Reliability Monitoring. *IEEE Transactions on Industrial Informatics. 17(2).* 839-848.

11. Melnichenko, A., Kustov, M., Basmanov, O., Tarasenko, O., Bogatov, O., Kravtsov, M., Petrova, O., Pidpala, T., Karatieieva, O., Shevchuk, N. (2022). Devising a procedure to forecast the level of chemical damage to the atmosphere during active deposition of dangerous gases. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 1 (10 (115)).* 31–40.

12. Kustov, M.V., Kaluhin, V.D. Prohnozuvannia intensyvnosti osadzhennia hazopodibnykh toksychnykh khimichnykh rechovyn atmosfernymy opadamy. *East European Science Journal. 2(6).* 52–59.

13. Vieceli, J., Roeselova, M., Tobias, D.J. (2004). Accommodation coefficients for water vapor at the air/water interface. *Chemical Physics Letters. 393. 1-3.* 249–255.

14. Davidovits, P., Kolb, C.E., Williams, L.R. and other. (2006). Mass Accommodation and Chemical Reactions at Gas−Liquid Interfaces. *Chemical Reviews. 106 (4).* 1323 – 1354.

15. Sander, R. (1999). Compilation of Henry's Law Constants for Inorganic and Organic Species of Potential Importance in Environmental Chemistry. *Mainz: Max-Planck Institute of Chemistry.* 107.

16. Ramm, V.M. (1976). Absorbtsiia haziv. *M.: Khimiia.* 656.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.В. Кустов, Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси, Україна

Автор: ЛЕСЬКО Андрій Сергійович
ад'юнкт
Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси
E-mail: orcid@obkat.com
ID ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2053-2362

INTENSITY OF CHEMICAL NEUTRALISATION OF CHLORINE DURING PRECIPITATION BY A FINELY DISPERSED LIQUID STREAM

Lesko Andrei
National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

One of the main tasks of the unified state system of civil protection is to forecast and assess the socio-economic consequences of emergencies, determine the need for forces, means, material and financial resources based on the forecast; carry out rescue and other urgent work to eliminate the consequences of emergencies, and organise life support for the affected population. The paper modifies the model of chlorine sorption by a fine liquid flow. The developed mathematical model allows to take into account the following basic parameters of sorption, environmental parameters, parameters of the liquid flow supplied for deposition and physical and chemical properties of the liquid in this flow. The developed model allows minimising the number of input parameters and the forecasting time, which is critical for emergency response. The results of numerical modelling have shown that the deposition of chlorine, which is a low-valent gas in water, is determined by the Henry's constant, and not by the intensity of the liquid flow, as previously thought. The poor solubility of chlorine in water does not provide significant efficiency (6% compared to ammonia) of its deposition by dispersed streams even at maximum intensity, which confirms the need for rescue units to use water-soluble additives that are chemically active to react with chlorine. It is also worth noting the logarithmic nature of the dependence of gas deposition intensity on the intensity of the dispersed flow. This can be explained by the fact that the intensity of sorption decreases due to a decrease in gas concentration, which in turn decreases due to the absorption process. Therefore, it is possible to determine the critical intensity of the liquid dispersion flow at which the sorption intensity almost stabilises. This confirms the urgent need for rescue units to use chemical neutralisers in the elimination of accidents involving chlorine emissions into the atmosphere.

Keywords: *fine stream, emergency, precipitation, sorption, chemical neutralisation. chlorine.*