

*А. С. Лесько<sup>1</sup>, ад'юнкт (ORCID 0009-0003-2053-2362)*

*О. В. Кулаков<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, пров.н.с. відділу (ORCID 0000-0001-5236-1949)*

*А. М. Катунін<sup>2</sup>, к.т.н., с.н.с., н.с. відділу (ORCID 0000-0003-2171-4558)*

*І. Г. Маладика<sup>3</sup>, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-8784-2814)*

<sup>1</sup>Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси, Україна

<sup>2</sup>Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, Україна

<sup>3</sup>Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна

## КІНЕТИКА ХІМІЧНОЇ НЕЙТРАЛІЗАЦІЇ ХЛОРУ ДРІБНОДИСПЕРСНИМ ПОТОКОМ ВОДИ З НЕЙТРАЛІЗАТОРОМ

Досліджена кінетика хімічної нейтралізації хлору при додаванні нейтралізаторів до дрібнодисперсного потоку води при осадженні. Показано, що активність хімічних нейтралізаторів, що можуть додаватися до дрібнодисперсного потоку води, є різною при хімічній реакції з хлором. Обґрунтовано доцільність для практичного використання хімічних нейтралізаторів хлору гідроксид натрію або гідроксид кальцію. На основі моделі нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком чистої води побудована математична модель нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком води з хімічним нейтралізатором. В основу моделі покладено припущення, що при хімічній нейтралізації хлору з дрібнодисперсним потоком води з нейтралізатором, швидкість хімічної реакції розраховується за стандартним рівнянням хімічної кінетики. Досліджена кінетика процесу хімічної нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком води з гідроксидом натрію. Додавання гідроксиду натрію до дрібнодисперсного потоку води веде до збільшення швидкості нейтралізації газоподібного хлору в усьому діапазоні зміни інтенсивності подачі дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором з динамікою, що є подібною випадку нейтралізації чистою водою. Інтенсивність подачі дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором гідроксид натрію доцільно обмежити величинами  $1,5 \div 1,7$  л/(с·м<sup>2</sup>). Збільшення концентрації нейтралізатору у воді веде до значного збільшення швидкості нейтралізації газоподібного хлору. При хімічній нейтралізації (осадженні) газоподібного хлору дрібнодисперсним потоком води з добавкою гідроксид натрію доцільно використання насичених розчинів. При інтенсивності 2,0 л/(с·м<sup>2</sup>) подачі дрібнодисперсного потоку та при концентрації 0,5 кг/кг гідроксиду натрію у воді швидкість нейтралізації газоподібного хлору збільшується на 90 %, а при концентрації 1,0 кг/кг – на 140 %.

**Ключові слова:** дрібнодисперсний потік води, модель, рівнянням хімічної кінетики, хімічна нейтралізація, хлор

### 1. Вступ

На хімічно небезпечних об'єктах постійно існує ризик виникнення аварій, що супроводжуються викидом хімічно небезпечних речовин в атмосферу. Гамма небезпечних хімічних речовин є досить широкою, але найбільш часто зустрічаються хлор та аміак.

Внаслідок широкого застосування хлору на об'єктах водопідготовки та водовідведення, аварії з викидом газоподібного хлору набули широкого розповсюдження у мирний час. Найбільш відомою є аварія в США, що відбулася 28 лютого 2019 року на підприємстві з водопостачання Birmingham Water Works (м. Бірмінгем) [1]. В Україні остання з відомих є аварія, що відбулася 01 грудня 2021 року на території підприємства «Південьвійськбуд» (м. Одеса). Ліквідацію наслідків таких аварій в Україні здійснюють підрозділи оперативно-рятувальної служби цивільного захисту.

Під час Великої війни (Першої Світової війни) хлор широко використовувався як хімічна зброя. Висока ефективність застосування хлору як бойової отруйної речовини була обумовлена неготовністю воюючих сторін до захисту та психологічним шоком від застосування нової зброї масового ураження. Після Великої війни засто-

сування хлору як бойової отрутої речовин носило епізодичний характер. Підтримку військ в операціях до, під час та після застосування хімічної зброї здійснюють війська радіаційного, хімічного та біологічного захисту Збройних Сил України.

Актуальність роботи у теперішній час додатково обумовлена відкритим воєнним нападом російської федерації на Україну, що відбувся 24 лютого 2022 року. Виникла загроза викиду хімічно небезпечних речовин внаслідок пошкодження технологічного обладнання хімічно небезпечних об'єктів внаслідок ведення бойових дій. У 2023 році ворожа ракета Х-22 влучила у магістральний аміакопровід Тольятті-Одеса та пошкодила його. Бойові дії тривають вже понад три роки. Ворогу не вдається добитися відчутних перемог за допомогою конвенційної зброї. Тому є ймовірність застосування хімічної зброї проти Збройних Сил України.

Ліквідація аварій з викидом хлору (або наслідків його бойового застосування) є складним завданням. Властивості хлору є смертельно небезпечними для життя людини. Хлор також є небезпечним з екологічної точки зору.

Основним методом нейтралізації хлору є осадження газової хмари водою. Це дозволяє відносно швидко та дешево зменшити у хмарі концентрацію хлору до безпечної.

Додатковим способом підвищення ефективності знешкодження хлору є його нейтралізація за допомогою хімічно активних речовин (нейтралізаторів), що додаються до дрібнодисперсного потоку води під час ліквідації аварії. На сьогодні розроблено методи прогнозування нейтралізації (осадження) небезпечних газів, але практично усі вони спрямовані на гази, що є легшими відносно повітря.

Таким чином, захист населення й військовослужбовців Збройних Сил України від впливу небезпечних хімічних речовин (у тому числі й бойових) є актуальним державним завданням в умовах воєнного стану. Існує проблема підвищення ефективності нейтралізації газоподібного хлору при викиді його в атмосферу.

## 2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Хлор є небезпечною хімічною речовиною, яка за нормальних умов є газом й переходить у рідкий стан при температурі мінус 34 °C [2].

Як показано в роботі [3] найбільш часто нейтралізація хімічно небезпечних газів, що потрапили в атмосферу, здійснюється шляхом осадження за допомогою дрібнодисперсних потоків чистої води. Перевагою застосування дрібнодисперсного потоку чистої води для нейтралізації хімічно небезпечних газів є простота та дешевина цього способу. З хімічної точки зору нейтралізація небезпечних газів з атмосфери чистою водою відбувається внаслідок міжфазового масообміну. Осадження хмари хімічно небезпечних газів дозволяє обмежити розміри зони хімічного забруднення [4], а й, за відповідних умов, повністю припинити розповсюдження цих газів [5]. В роботі [6] показано, що оптимізація дисперсності потоку води, що подається, дозволяє майже вдвічі скоротити час осадження небезпечної речовини, зокрема газів, що є легшими відносно повітря.

Недоліком застосування дрібнодисперсного потоку чистої води для нейтралізації хімічно небезпечних газів є низька ефективність нейтралізації, особливо для газів, що є важкими відносно повітря. В роботі [7] показано, що інтенсивність осадження хлору, що є важким газом відносно повітря, дрібнодисперсними потоками чистої води складає усього 6 % від інтенсивності осадження аміаку, що є легким газом відносно повітря, при оптимальній інтенсивності подачі та дисперсності кра-

пель водного потоку. Таким чином, загальним недоліком робіт [3–6] є можливість застосування їх результатів для нейтралізації газів, що є легшими відносно повітря.

В роботі [8] показано, що підвищення інтенсивності нейтралізації хімічно небезпечних газів, що потрапили в атмосферу, можна отримати шляхом додавання хімічних добавок (нейтралізаторів) до води, які нейтралізують їх внаслідок відповідних хімічних реакцій. Але в роботі відсутні рекомендації по оптимальності застосування нейтралізаторів різного типу та чисельні рекомендації щодо інтенсивності їх подачі.

Таким чином, нерозв'язаною частиною розглянутої проблеми є відсутність математичної моделі, яка описує процес нейтралізації газоподібного хлору (газу, що є важким відносно повітря) за допомогою додавання до дрібнодисперсного потоку води хімічно активних речовин – нейтралізаторів.

### **3. Мета та завдання дослідження**

Метою роботи є розробка моделі нейтралізації газоподібного хлору дрібнодисперсним потоком води з додаванням хімічних нейтралізаторів та дослідження кінетики процесу нейтралізації.

Досягнення поставленої мети передбачає розв'язання наступних завдань:

1. Дослідити активність хімічної нейтралізації хлору при додаванні нейтралізаторів до дрібнодисперсного потоку води при осадженні.
2. Побудувати модель та дослідити кінетику процесу нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком води з хімічним нейтралізатором.

### **4. Матеріали та методи дослідження**

Об'єктом дослідження є процес хімічної нейтралізації газоподібного хлору при його примусовому осадженні дрібнодисперсним потоком води з додаванням нейтралізатору.

Предметом дослідження є параметри нейтралізації газової хмари при ліквідації аварій з викидом газоподібного хлору шляхом примусового осадження дрібнодисперсним потоком води з додаванням хімічного нейтралізатору.

Гіпотезою дослідження є припущення, що при хімічній нейтралізації хлору з дрібнодисперсним потоком води з нейтралізатором, швидкість хімічної реакції розраховується за стандартним рівнянням хімічної кінетики. Це дозволить побудувати на основі раніше запропонованої моделі нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком чистої води модель хімічної нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком з нейтралізатором.

Для побудови моделі хімічної нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком з нейтралізатором використовуємо стандартне рівняння хімічної кінетики.

Розрахунки проводитимуться засобами обчислювальної техніки з використанням програми Maple та MatLab.

### **5. Дослідження активності хімічної нейтралізації хлору при додаванні нейтралізаторів**

Найпростішим методом нейтралізації хлору є його осадження за допомогою потоку дрібнодисперсної води, що формується відповідними стволами. При 10 °C та атмосферному тиску один літр води нейтралізує до 3,10 л газоподібного хлору, при 30 °C та атмосферному тиску один л води нейтралізує до 1,77 л газоподібного хлору [2]. Процес нейтралізації супроводжується хімічною реакцією:



Утворюються соляна (хлоридна) кислота  $\text{HCl}$ , яка за силою є сильною кислотою, та хлорноватиста кислота  $\text{HClO}$ , яка за силою є слабкою кислотою [9, 10]. Властивості кислоти залежать від її концентрації у водному розчині. Концентрованою вважається соляна кислота, що містить 37 %  $\text{HCl}$  у воді. Хлорноватиста кислота є нестійкою й розкладається у водному розчині на соляну кислоту та атомарний кисень:



В роботі [7] показано, що збільшення інтенсивності подачі дрібнодисперсного потоку чистої води при осадженні хлору з атмосфери не дозволяє досягти навіть середніх показників інтенсивності нейтралізації у порівнянні з іншими небезпечними газами. Зокрема, при інтенсивності подачі  $2 \text{ л/с/м}^2$  потоку чистої води з дисперсністю крапель  $1 \text{ мкм}$  інтенсивність нейтралізації хлору складає  $3,0 \cdot 10^3 \text{ моль/с/м}^3$ . Також встановлено, що при інтенсивності подачі дрібнодисперсного потоку чистої води більше від  $I_w = 1,57 \text{ л/(с} \cdot \text{м}^2)$ , інтенсивність нейтралізації хлору практично не збільшується. Це пов'язано із непропорційно низькою величиною постійної Генрі  $H$  хлору у порівнянні з іншими небезпечними газами. Для газу аміак  $\text{NH}_3$  постійна Генрі хлору менше у 290 разів, парів соляної кислоти  $\text{HCl}$  – у 204 рази, парів дихлорангідрид вугільної кислоти (фосген)  $\text{COCl}_2$  – у 118 разів, парів синильної кислоти (ціанід водню)  $\text{HCN}$  – у 80 разів [11]. Як наслідок, хлор має низьку розчинність у воді у порівнянні, наприклад, з аміаком.

Для збільшення інтенсивності нейтралізації хлору до води додаються хімічно-активні речовини – сполуки лужних металів натрію, калію та кальцію (гідроксид натрію  $\text{NaOH}$ , гідроксид калію  $\text{KOH}$ , карбонат натрію  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , гідроксид кальцію  $\text{Ca(OH)}_2$ , сульфід натрію  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ , тіосульфат натрію  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ), а також хлорид заліза  $\text{FeCl}_2$  та перекис водню  $\text{H}_2\text{O}_2$  [12].

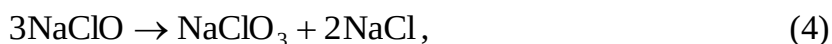
Розглянемо більш детально хімічні реакції нейтралізації хлору за допомогою дрібнодисперсного потоку води з переліченими нейтралізаторами.

Для нейтралізатору водний розчин розчину гідроксиду натрію:



енергія Гіббса (термодинамічний потенціал) системи  $\Delta G = -524,11 \text{ кДж/кг}$ .

Утворений при цьому гіпохлорит натрію звичайно розкладається з утворенням хлориду натрію та кисню:



Для нейтралізатору водний розчин гідроксиду калію:



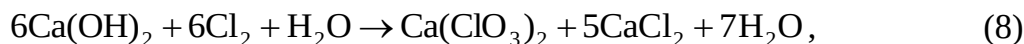
енергія Гіббса системи  $\Delta G = -223,24 \text{ кДж/кг}$ .

Для нейтралізатору водний розчин карбонату натрію:



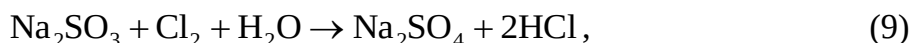
енергія Гіббса системи  $\Delta G = 801,1$  кДж / кг .

Для нейтралізатору водний розчин гідроксиду кальцію:



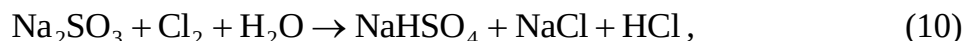
енергія Гіббса системи  $\Delta G = -795,19$  кДж / кг .

Для нейтралізатору водний розчин сульфіту натрію:



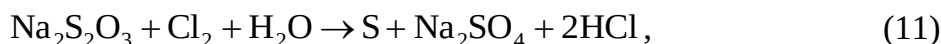
енергія Гіббса системи  $\Delta G = -294,56$  кДж / кг .

Або



енергія Гіббса системи  $\Delta G = -217,33$  кДж / кг .

Для нейтралізатору водний розчин тіосульфату натрію:



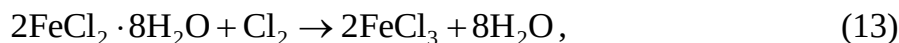
енергія Гіббса системи  $\Delta G = -1087,46$  кДж / кг .

Або



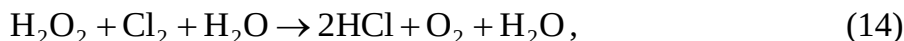
енергія Гіббса системи  $\Delta G = -1299,1$  кДж / кг .

Для нейтралізатору водний розчин хлориду заліза:



енергія Гіббса системи  $\Delta G = -272,0$  кДж / кг .

Для нейтралізатору водний розчин перекису водню:



енергія Гіббса системи  $\Delta G = -70,18$  кДж / кг .

Енергія Гіббса  $\Delta G$  реакції є показником активності хімічної реакції. Тому при відповідності решти параметрів процесу сорбції по цьому показнику можна оцінювати активність нейтралізаторів. На рис. 1 для порівняння приведена величина енергії Гіббса ( $-\Delta G$ ) для основних видів нейтралізаторів хлору.

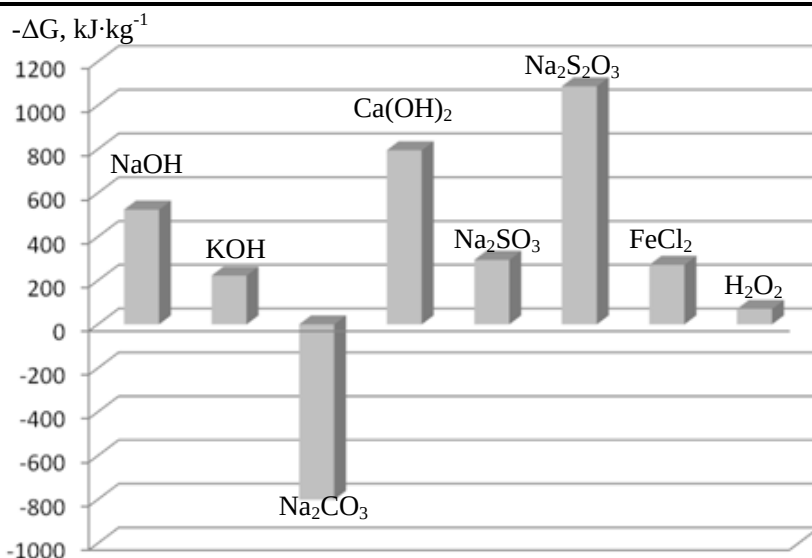


Рис. 1. Величина енергії Гіббса ( $-\Delta G$ ) для основних видів нейтралізаторів хлору

### 6. Моделювання та дослідження кінетики процесу нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком води

В присутності хімічної реакції абсорбенту з абсорбатом для розрахунку швидкості  $V_{\text{sorb}}$  абсорбції хлору є некоректним використання рівняння (7) [7]:

$$V_{\text{sorb}} = I_{\text{coll}} \cdot \theta_{\text{sorb}} \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{D_{\text{drop}}}{\pi \tau}}, \quad (15)$$

де  $I_{\text{coll}}$  – частота зіткнень молекул хлору з поверхнею краплі (розраховується за формулою (4) [7]),  $\theta_{\text{sorb}}$  – коефіцієнт насичення поверхневого шару води абсорбованим газом (розраховується за формулою (5) [7]),  $\alpha$  – коефіцієнт акомодатії,  $D_{\text{drop}}$  – коефіцієнт дифузії краплини дрібнодисперсного потоку,  $\tau$  – характерний час процесу.

В таких випадках необхідним є врахування швидкості  $V_{\text{react}}$  хімічної реакції, яка розраховується за стандартним рівнянням хімічної кінетики:

$$V_{\text{react}} = k \cdot C_A^a \cdot C_B^b, \quad (16)$$

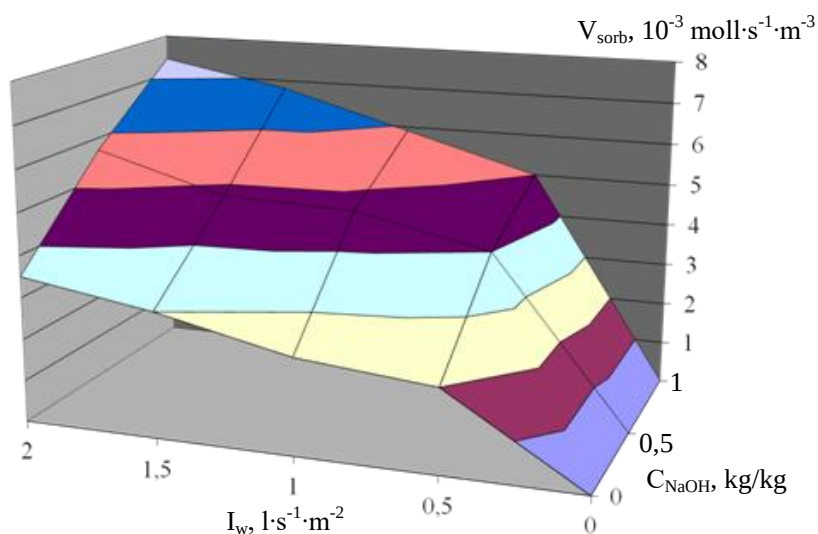
де  $k$  – константа швидкості реакції,  $C_A$  та  $C_B$  – молярні концентрації реагентів А та В, а та b – кінетичний порядок реакції по речовині А та В відповідно.

З урахуванням енергії Гіббса  $\Delta G$  константа швидкості реакції  $k$  визначається як:

$$k = \exp\left(\frac{\Delta G}{R \cdot T}\right). \quad (17)$$

З урахуванням рівнянь (16) та (17) рівняння (15) для розрахунку швидкості  $V_{\text{sorb}}$  абсорбції газу дрібнодисперсним потоком води з нейтралізатором можна записати наступним чином:

$$V_{\text{sorb}} = I_{\text{coll}} \cdot \theta_{\text{sorb}} \cdot \alpha \cdot \sqrt{D_{\text{drop}} \cdot V_{\text{react}}} \quad (18)$$



**Рис. 2.** Кінетика швидкості  $V_{\text{sorb}}$  абсорбції газоподібного хлору в залежності від інтенсивності  $I_w$  подачі водного розчину нейтралізатора гідроксид натрію та концентрації  $C_{\text{NaOH}}$  нейтралізатора у воді

На рис. 2 приведена кінетика швидкості  $V_{\text{sorb}}$  абсорбції газоподібного хлору в залежності від інтенсивності  $I_w$  подачі водного розчину нейтралізатору гідроксид натрію  $\text{NaOH}$  та його концентрації  $C_{\text{NaOH}}$  у воді, розраховані за формулою (18). Дисперсність потоку прийнята рівною 1 мкм.

## 7. Обговорення результатів моделювання нейтралізації хлору

Проведений аналіз активності хімічних нейтралізаторів, що додаються до дрібнодисперсного потоку води, показав, що вони мають різну активність при хімічній реакції з хлором.

Низьку активність при реакції з хлором мають нейтралізатори гідроксид калію  $\text{KOH}$ , сульфат натрію  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ , хлорид заліза  $\text{FeCl}_2$  та перекис водню  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Також в результаті хімічної реакції нейтралізації при використанні цих речовин утворюється хімічно сильна соляна кислота  $\text{HCl}$ .

Найбільшу хімічну активність до хлору має тіосульфат натрію  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ , однак, як показано вище, водний розчин даної речовини з хлором реагує з утворення відразу двох сильних кислот – сірчаної  $\text{H}_2\text{SO}_4$  та соляної  $\text{HCl}$ . Відповідно при осадженні газоподібного хлору з атмосфери такими розчинами може відбутися екологічне забруднення ґрунту. В деяких випадках це може призвести до виникнення небезпеки для рятувальників, які знаходяться у безпосередній близькості до зони осадження й можуть контактувати з рідиною, що розтікається по поверхні після осадження. Крім цього сірчана  $\text{H}_2\text{SO}_4$  та соляна  $\text{HCl}$  кислоти призводять до пошкодження рятувального обладнання – пожежних автомобілів та пожежно-технічного обладнання, що задіяне для ліквідації аварії.

Таким чином, для практичного використання підрозділами оперативно-рятувальної служби цивільного захисту слід рекомендувати використання двох хімічних нейтралізаторів хлору – гідроксиду натрію  $\text{NaOH}$  або гідроксиду каль-

цію  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Як видно з рівнянь (3–5) хімічних реакцій при взаємодії гідроксиду натрію  $\text{NaOH}$  з хлором утворюється хлорат натрію  $\text{NaClO}$ , який у подальшому розкладається з утворенням малоактивної солі хлорид натрію  $\text{NaCl}$  (поварена сіль). З рівняння (8) видно, що при хімічній реакції гідроксиду кальцію  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  з хлором утворюється малоактивна сіль хлорид кальцію  $\text{CaCl}_2$  (морська сіль).

Різну активність хімічних нейтралізаторів, що додаються до дрібнодисперсного потоку води при хімічній реакції з хлором, можна пояснити різними хімічними властивостями досліджених нейтралізаторів

Особливістю запропонованого методу моделювання процесу нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком води з хімічним нейтралізатором є застосування стандартного рівняння хімічної кінетики для розрахунку швидкості хімічної реакції у методі моделювання процесу нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком чистої води. Внаслідок цього підвищується адекватність моделювання для випадку застосування хімічних нейтралізаторів при відносно незначному ускладненні чисельного розрахунку.

На рис. 2 приведена кінетика швидкості  $V_{\text{sorb}}$  абсорбції газоподібного хлору в залежності від інтенсивності  $I_w$  подачі водного розчину нейтралізатора гідроксид натрію та концентрації  $C_{\text{NaOH}}$  нейтралізатора у воді. Видно, що швидкість  $V_{\text{sorb}}$  абсорбції газоподібного хлору при його осадженні дрібнодисперсним потоком води без добавок збільшується зі збільшенням інтенсивності  $I_w$  його подачі. При збільшенні інтенсивності  $I_w$  подачі дрібнодисперсного потоку чистої води від 0 до  $I_w = 0,5 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$  спостерігається збільшення швидкості  $V_{\text{sorb}}$  абсорбції газоподібного хлору від 0 до  $V_{\text{sorb}} = 2,0 \text{ моль}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$ . Подальше збільшення інтенсивності  $I_w$  подачі дрібнодисперсного потоку чистої води до значення  $I_w = 1,57 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$  призводить до менш швидкого збільшення швидкості  $V_{\text{sorb}}$  абсорбції газоподібного хлору до величини  $V_{\text{sorb}} = 3,0 \text{ моль}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$ . При інтенсивності подачі дрібнодисперсного потоку чистої води більше ніж  $I_w = 1,57 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ , інтенсивність нейтралізації хлору практично не збільшується, що підтверджує відповідність побудованої моделі нейтралізації результатам попередніх досліджень [4].

Додавання нейтралізатору гідроксид натрію  $\text{NaOH}$  до дрібнодисперсного потоку води веде до збільшення швидкості  $V_{\text{sorb}}$  абсорбції газоподібного хлору в усьому діапазоні зміни інтенсивності  $I_w$  подачі дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором з динамікою, що є подібною випадку нейтралізації чистою водою.

При концентрації  $C_{\text{NaOH}} = 0,5 \text{ кг}/\text{кг}$  гідроксиду натрію у воді відбувається збільшення швидкості  $V_{\text{sorb}}$  абсорбції газоподібного хлору. При збільшенні інтенсивності  $I_w$  подачі дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором від 0 до  $I_w = 0,6 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$  спостерігається збільшення швидкості  $V_{\text{sorb}}$  абсорбції газоподібного хлору від 0 до  $V_{\text{sorb}} = 4,0 \text{ моль}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$ . Подальше збільшення інтенсивності  $I_w$  подачі дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором до значення  $I_w = 1,6 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$  призводить до менш швидкого збільшення швидкості  $V_{\text{sorb}}$  абсорбції газоподібного хлору до величини  $V_{\text{sorb}} = 5,0 \text{ моль}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$ . При інтенсивності подачі дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором більше ніж



$I_w = 1,6 \text{ л/(с} \cdot \text{м}^2)$  інтенсивність нейтралізації хлору збільшується менш інтенсивно до величини  $V_{\text{sorb}} = 5,8 \text{ моль/(с} \cdot \text{м}^3)$  при  $I_w = 2,0 \text{ л/(с} \cdot \text{м}^2)$ .

При концентрації  $C_{\text{NaOH}} = 1,0 \text{ кг/кг}$  гідроксиду натрію у воді відбувається ще більш інтенсивне збільшення швидкості  $V_{\text{sorb}}$  абсорбції газоподібного хлору. При збільшенні інтенсивності  $I_w$  подачі дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором від 0 до  $I_w = 0,7 \text{ л/(с} \cdot \text{м}^2)$  спостерігається збільшення швидкості  $V_{\text{sorb}}$  абсорбції газоподібного хлору від 0 до  $V_{\text{sorb}} = 5,0 \text{ моль/(с} \cdot \text{м}^3)$ . Подальше збільшення інтенсивності  $I_w$  подачі дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором до значення  $I_w = 1,7 \text{ л/(с} \cdot \text{м}^2)$  призводить до менш швидкого збільшення швидкості  $V_{\text{sorb}}$  абсорбції газоподібного хлору до величини  $V_{\text{sorb}} = 6,8 \text{ моль/(с} \cdot \text{м}^3)$ . При інтенсивності подачі дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором більше ніж  $I_w = 1,7 \text{ л/(с} \cdot \text{м}^2)$  інтенсивність нейтралізації хлору збільшується менш інтенсивно до величини  $V_{\text{sorb}} = 7,4 \text{ моль/(с} \cdot \text{м}^3)$  при  $I_w = 2,0 \text{ л/(с} \cdot \text{м}^2)$ .

Таким чином можна зробити висновок, що інтенсивність  $I_w$  подачі дрібнодисперсного потоку як чистої води, так й з нейтралізатором гідроксид натрію NaOH доцільно обмежити величинами  $I_w = 1,5 \div 1,7 \text{ л/(с} \cdot \text{м}^2)$ . Це пояснюється тим, що при подальшому збільшенні  $I_w$  швидкість  $V_{\text{sorb}}$  абсорбції газоподібного хлору збільшується незначно. Збільшення концентрації  $C_{\text{NaOH}}$  нейтралізатору у воді веде до значного збільшення швидкості  $V_{\text{sorb}}$  абсорбції газоподібного хлору. Так при максимально дослідженій інтенсивності  $I_w = 2,0 \text{ л/(с} \cdot \text{м}^2)$  подачі дрібнодисперсного потоку швидкість  $V_{\text{sorb}}$  абсорбції газоподібного хлору збільшується від  $V_{\text{sorb}} = 3,0 \text{ моль/(с} \cdot \text{м}^3)$  для дрібнодисперсного потоку чистої води до  $V_{\text{sorb}} = 5,8 \text{ моль/(с} \cdot \text{м}^3)$  для дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором гідроксид натрію NaOH в концентрації  $C_{\text{NaOH}} = 0,5 \text{ кг/кг}$  (у 1,9 разів) й до  $V_{\text{sorb}} = 7,4 \text{ моль/(с} \cdot \text{м}^3)$  для дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором гідроксид натрію NaOH в концентрації  $C_{\text{NaOH}} = 1,0 \text{ кг/кг}$  (у 2,4 рази).

## 8. Висновки

1. Проведені дослідження хімічної активності нейтралізаторів гідроксид натрію, гідроксид калію, карбонат натрію, гідроксид кальцію, сульфід натрію, тіосульфат натрію, хлорид заліза та перекис водню, що можуть додаватися до дрібнодисперсного потоку води, показали, що вони мають різну активність при хімічній реакції з хлором. Низьку активність мають гідроксид калію, сульфід натрію, хлорид заліза та перекис водню. В результаті хімічної реакції нейтралізації при використанні цих речовин утворюється соляна кислота, яка відноситься до сильних кислот. Найбільшу хімічну активність до хлору має тіосульфат натрію. Однак водний розчин тіосульфат натрію реагує з хлором з утворення сірчаної та соляної кислот, які є сильними. Для практичного використання доцільно використання хімічних нейтралізаторів хлору гідроксид натрію або гідроксид кальцію. Внаслідок хімічних реакцій водних розчинів гідроксиду натрію та гідроксиду кальцію з хлором утворюються малоактивні хлорид натрію (поварена сіль) та хлорид кальцію (морська сіль).

2. Побудована математична модель нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком води з хімічним нейтралізатором. В основу моделі покладено припущення, що при хімічній нейтралізації хлору з дрібнодисперсним потоком води з нейтралізатором, швидкість хімічної реакції розраховується за стандартним рівнянням хімічної кінетики. Це дозволило побудувати на основі моделі нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком чистої води модель хімічної нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком з нейтралізатором. Працездатність побудованої моделі перевірена на прикладі нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком чистої води. Досліджена кінетика процесу хімічної нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком води з нейтралізатором гідроксид натрію. Додавання гідроксиду натрію до дрібнодисперсного потоку води веде до збільшення швидкості нейтралізації газоподібного хлору в усьому діапазоні зміни інтенсивності подачі дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором з динамікою, що є подібною випадку нейтралізації чистою водою. Інтенсивність подачі дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором гідроксид натрію (як й чистої води) доцільно обмежити величинами  $1,5 \div 1,7 \text{ л/(с}\cdot\text{м}^2)$ . Збільшення концентрації нейтралізатору у воді веде до значного збільшення швидкості нейтралізації газоподібного хлору. При дослідженій інтенсивності  $2,0 \text{ л/(с}\cdot\text{м}^2)$  подачі дрібнодисперсного потоку та при концентрації  $0,5 \text{ кг/кг}$  гідроксиду натрію у воді швидкість нейтралізації газоподібного хлору збільшується на 90 %, а при концентрації  $1,0 \text{ кг/кг}$  – на 140 %. Тому при хімічній нейтралізації (осадженні) газоподібного хлору дрібнодисперсним потоком води з добавкою гідроксид натрію доцільно використання насичених розчинів. Для перевірки адекватності побудованої моделі та підтвердження достовірності отриманих результатів є необхідним проведення експериментальних досліджень, що заплановано.

### Література

1. 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>
2. Chlorine. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Chlorine>
3. Pospelov B., Rybka E., Meleshchenko R., Borodych P., Gornostal S. Development of the method for rapid detection of hazardous atmospheric pollution of cities with the help of recurrence measures. Eastern-European Journal of Enterprise. 2019. Vol. 1. № 10(97). P. 29–35.
4. Yan X., Zhou Y., Diao H., Gu H., Li Y. Development of mathematical model for aerosol deposition under jet condition. Annals of Nuclear Energy. 2020. Vol. 142. P. 107394.
5. Kustov M. V., Melnychenko A. S., Taraduda D. V., Korogodska A. M. Research of the chlorine sorption processes when its deposition by water aerosol. Scientific journal «Materials Science Forum» Switzerland: Trans Tech Publications Ltd. 2021. Vol. 1038. P. 361–373.
6. Elperin T., Fominykh A., Krasovitev B., Vikhansky A. Effect of rain scavenging on altitudinal distribution of soluble gaseous pollutants in the atmosphere. Atmospheric Environment. 2011. Vol. 45. Issue 14. P. 2427–2433.
7. Лесько А. С. Інтенсивність хімічної нейтралізації хлору при осадженні дрібнодисперсним рідинним потоком. Комунальне господарство міст. Серія: технічні науки та архітектура. 2024. Т. 6. Вип. 187. С. 278–283.

8. Wei L. Research on Countermeasures and Methods of Disposing Incidents of Hazardous Chemicals Reacting with Water. *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 26. P. 2278–2286.

9. Hydrochloric acid. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrochloric\\_acid](https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrochloric_acid)

10. Hypochlorous acid. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Hypochlorous\\_acid](https://en.wikipedia.org/wiki/Hypochlorous_acid)

11. 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](https://www.ready.noaa.gov/documents/TutorialX/files/Chem_henry.pdf)

12. Neutralisation of chlorine and sulphur dioxide. URL: <https://www.i4t.pl/en/technologies/neutralisation-of-chlorine-and-sulphur-dioxide>

*A. Lesko<sup>1</sup>, Adjunct*

*O. Kulakov<sup>1</sup>, PhD, Associate Professor, Leading Researcher of the Department*

*A. Katunin<sup>2</sup>, PhD, Senior Research Scientist, Researcher of the Department*

*I. Maladyka<sup>3</sup>, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*

<sup>1</sup>*National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine*

<sup>2</sup>*Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine*

<sup>3</sup>*Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine*

## KINETICS OF CHEMICAL NEUTRALISATION OF CHLORINE BY A SMALL DISPERSED WATER STREAM WITH A NEUTRALISER

The kinetics of chemical neutralization of chlorine when neutralizers are added to a fine water stream during precipitation is investigated. It has been shown that the activity of chemical neutralizers that can be added to a fine water stream is different in the chemical reaction with chlorine. The practical application of sodium hydroxide or calcium hydroxide as chemical chlorine neutralisers is proposed. On the basis of the model of chlorine neutralisation by a small dispersed stream of clean water, a mathematical model of chlorine neutralisation by a small dispersed stream of water with a chemical neutraliser was developed. The model is based on the assumption that during the chemical neutralisation of chlorine with a small dispersed water stream with a neutraliser, the chemical reaction rate is calculated according to the standard chemical kinetics equation. The kinetics of the process of chemical neutralisation of chlorine by a small dispersed water stream with sodium hydroxide has been studied. The addition of sodium hydroxide to the small dispersed water stream leads to an increase in the rate of neutralisation of gaseous chlorine over the full range of changes in the intensity of the small dispersed water stream with the neutraliser with dynamics similar to the case of neutralisation with pure water. It is recommended to limit the intensity of the supply of a small dispersed stream of water with the sodium hydroxide neutraliser to  $1.5 \div 1.7 \text{ l/(s} \cdot \text{m}^2)$ . An increase in the concentration of the neutraliser in water will result in a significant increase in the rate of neutralisation of gaseous chlorine. For chemical neutralisation (deposition) of gaseous chlorine with a small dispersed water stream with the addition of sodium hydroxide, it is advisable to use concentrated mixtures. At an intensity of  $2.0 \text{ l/(s} \cdot \text{m}^2)$  of a small dispersed water stream and a concentration of  $0.5 \text{ kg/kg}$  of sodium hydroxide in the water, the rate of neutralisation of gaseous chlorine increases by 90 %, and at a concentration of  $1.0 \text{ kg/kg}$  – by 140 %.

**Keywords:** chemical kinetics equation, chemical neutralisation, chlorine, model, small dispersed water stream

## References

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

2. Chlorine. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Chlorine>

3. Pospelov, B., Rybka, E., Meleshchenko, R., Borodych P., Gornostal, S. (2019). Development of the method for rapid detection of hazardous atmospheric pollution of

cities with the help of recurrence measures. *Eastern-European Journal of Enterprise*, 1(10((97))), 29–35.

4. Yan, X., Zhou, Y., Diao, H., Gu, H., Li Y. (2020). Development of mathematical model for aerosol deposition under jet condition. *Annals of Nuclear Energy*, 142, 107394.

5. Kustov, M. V., Melnychenko, A. S., Taraduda, D. V., Korogodska, A. M. (2021). Research of the chlorine sorption processes when its deposition by water aerosol. *Scientific journal «Materials Science Forum» Switzerland: Trans Tech Publications Ltd*, 1038, 361–373.

6. Elperin, T., Fominykh, A., Krasovitev, B., Vikhansky, A. (2011). Effect of rain scavenging on altitudinal distribution of soluble gaseous pollutants in the atmosphere. *Atmospheric Environment*, 45(14), 2427–2433.

7. Les'ko, A. S. (2024). Intensyvniŭ khimichnoyi neytralizatsiyi khloru pry osadzhenni dribnodispersnym ridynnym potokom. *Komunal'ne hospodarstvo mist. Seriya: tekhnichni nauky ta arkhitektura*, 6(187), 278–283.

8. Wei, L. (2011). Research on Countermeasures and Methods of Disposing Incidents of Hazardous Chemicals Reacting with Water. *Procedia Engineering*, 26, 2278–2286.

9. Hydrochloric acid. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrochloric\\_acid](https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrochloric_acid)

10. Hypochlorous acid. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Hypochlorous\\_acid](https://en.wikipedia.org/wiki/Hypochlorous_acid)

11. 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. Available at: [https://www.ready.noaa.gov/documents/TutorialX/files/Chem\\_henry.pdf](https://www.ready.noaa.gov/documents/TutorialX/files/Chem_henry.pdf)

12. Neutralisation of chlorine and sulphur dioxide. Available at: <https://www.i4t.pl/en/technologies/neutralisation-of-chlorine-and-sulphur-dioxide>

Надійшла до редколегії: 25.02.2025

Прийнята до друку: 23.04.2025