

УДК 331.452+614.845

*Мамаснко С. О., аспірант спец. 263 Цивільна безпека, факультет ЦІтаЕ
Науковий керівник: Налисько М. М., д.т.н., проф. кафедри ОПЦТБ*

АНАЛІЗ НАСЛІДКІВ ВИБУХУ ХМАРИ ПАРИ ВИКИДУ З НАКОПИЧУВАЧА ВОДНЮ

Водень зазвичай зберігається у стиснутому газоподібному стані через його низьку енергетичну щільність за об'ємом. Його фізичні та хімічні властивості суттєво відрізняються від інших палив, таких як природний газ. А саме такі відмінності як на нижча температура кипіння, густина, мінімальна енергія займання та температура самозаймання, а також вищий діапазон займистості, коефіцієнт дифузії та теплота згоряння. Наприклад, енергія займання водню надзвичайно мала (0,017 МДж проти 0,29 МДж у метану), а діапазон його займистості значно ширший (4–75% проти 5–15%). Такі характеристики значно підвищують ризик займання при витoku. Типове зберігання здійснюється під тиском 350–700 бар у резервуарах або під землею. Підвищення тиску для збільшення густини потребує посилення стінок ємностей, що ускладнює конструкцію. Рідкий водень також використовується, але через високу швидкість випаровування (1–5% на день) стиснутий газ є переважним варіантом, зокрема для паливних елементів у транспорті [1].

Оцінка ризиків щодо безпеки водню включає аналіз ймовірності виникнення події та оцінку її можливих наслідків. В роботі розглянуто аналіз наслідків, зокрема у випадках витoku під високим тиском. Подальший розвиток подій після витoku – чи буде газ розсіяно або запалено – визначає різні сценарії. Вибух хмари пари хоча і менш ймовірний, ніж займання, але має найважчі наслідки через утворення надлишкового тиску та ударної хвилі. Особливо небезпечні такі вибухи в обмежених або захищених середовищах, де турбулентність підсилює енергію займання. Точний аналіз наслідків є критичним для планування безпечних зон навколо об'єктів.

Аналіз зроблено за результатами досліджень у триетапному моделюванні сценаріїв витoku водню та можливого вибуху наведеному у [1]. Спочатку застосовується теорія умовного сопла для моделювання фази витoku, розраховуючи ефективний діаметр та швидкість потоку. Ці дані передаються у CFD-модель (чисельне моделювання течій) для моделювання дисперсії газу. CFD розраховує масу водню, яка залишається у межах вибухонебезпечної концентрації після змішування з повітрям. У фінальному етапі ця маса використовується в моделі еквівалентності до ТНТ для оцінки надлишкового тиску від вибуху [2]. Це дозволяє уникнути завищення оцінки, яке виникає при врахуванні всієї маси витoku як потенційно вибухової.

Для моделювання дисперсії водню застосовано тривимірний CFD-підхід, який враховує рівняння збереження маси, імпульсу, енергії та переносу речовини. Суміш водню та повітря моделюється як ідеальний газ, а розрахунок

проводиться у стаціонарному режимі, оскільки дисперсія водню відбувається протягом кількох секунд. Розглядалися різні моделі турбулентності, серед яких найкращу відповідність експериментальним даним показала стандартна модель з похибкою менше 20%. Саме маса займистого газу (концентрація 4–75 %) є основним вихідним параметром, який передається у вибухову модель.

Для перевірки моделі використовувалися дані з 23 експериментів із витоком водню, проведених компанією Shell та HSL. Досліджувалися різні діаметри отворів (3–12 мм) та тиск (1,1–13,7 МПа) [14]. Модель успішно відтворила профілі концентрації газу, виміряні сенсорами на різних відстанях. Виявлено, що концентрація водню зазвичай зменшується нижче 4 % на відстані 10–11 м, що добре відповідає експерименту. Це підтверджує здатність моделі точно відтворювати реальну поведінку газу при витоку. Розглянуто сценарій витоку водню з резервуару під високим тиском, розташованого поблизу автостоянки та будівель. Моделювалися варіанти з різними напрямками витоку, швидкістю вітру та розміром отвору. Встановлено, що витік униз дав найбільшу масу займистого газу, оскільки вертикальна дисперсія була зменшена. Вітер мав помірний вплив – при збільшенні швидкості відбувалося швидше розбавлення газу. Найбільший вплив мав діаметр отвору: при його збільшенні з 3 мм до 50,8 мм маса займистого водню зростала майже в 700 разів.

Результати підкреслюють, що діаметр отвору випуску є визначальним чинником у тяжкості вибуху, тоді як напрямок випуску та швидкість вітру мають другорядне, але все ж важливе значення. Запропонована методологія підвищує якість оцінки ризиків і може сприяти безпечнішому впровадженню водню в промислових і громадських умовах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Abohamzeh E, Salehi F, Sheikholeslami M, Abbassi R, Khan F. Review of hydrogen safety during storage, transmission, and applications processes. *J Loss Prev Process Ind* 2021;72:104569.
2. Biao Sun, Thomas Loughnan WA School of Mines: Mineral, Energy and Chemical Engineering, Curtin University, GPO Box U1987, Perth, WA 6845, Australia Consequence analysis of vapour cloud explosion from the release of high-pressure hydrogen storage
3. Roberts P, Shirvill L, Roberts T, Butler C, Royle M. Dispersion of hydrogen from high-pressure sources. Institution of chemical engineers symposium series. Institution of Chemical Engineers; 1999; 2006. p. 410.