

АНАЛІЗ НЕБЕЗПЕК НА ГАЗОНАПОВНЮВАЛЬНИХ ПУНКТАХ

Чернова О.Т., Кривенко Г.М.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, 76019, м. Івано-Франківськ
galyakrivenko73@gmail.com

Технологічні операції, пов'язані зі зберіганням скраплених вуглеводневих газів, зливанням і заповненням залізничних і автомобільних цистерн, балонів є небезпечними з огляду високої ймовірності виникнення вибухів і пожеж, що призводять до забруднення навколишнього середовища, травм і загибелі людей, завдають значних матеріальних збитків, негативно впливають на здоров'я населення. Під час експлуатації газонаповнювальних пунктів не досить враховується їх вплив на довкілля, оцінюються й аналізуються небезпеки, пов'язані зі специфікою їх роботи. Тому виникла потреба у проведенні досліджень впливу чинників на аварійні ситуації, що призводять до пожеж, вибухів і втрат.

Метою роботи є аналіз небезпек на газонаповнювальних пунктах з урахуванням комплексного дослідження чинників, що впливають на них. Об'єктом дослідження є газонаповнювальний пункт, призначений для приймання скрапленого вуглеводневого газу з цистерн, його зберігання і відвантаження. Небезпеки об'єкта дослідження зумовлені наявністю всередині обладнання і трубопроводів скрапленого вуглеводневого газу в газоподібному і рідкому стані.

Розраховано кількісні показники вибухонебезпеки. Проведено комплексний аналіз енергетичного потенціалу і рівня небезпеки для запобігання аварійності. За значенням відносного енергетичного потенціалу та приведеної маси горючих газів визначена категорія вибухонебезпеки. Досліджено стадії розвитку аварійної ситуації під час експлуатації цистерни. Основною небезпекою аварії з цистерною є можливість залпового викиду великої кількості скраплених вуглеводневих газів.

Результати наукової роботи в комплексі з іншими дослідженнями дадуть змогу визначити потенційні загрози при вибухах і пожежах на об'єктах газонаповнювальних пунктів, що дасть можливість розробити заходи щодо запобігання виникненню шкідливих впливів на довкілля. *Ключові слова:* скраплений вуглеводневий газ, газонаповнювальний пункт, цистерна, пожежна небезпека, «вогняна куля».

Danger analysis at gas filling stations. Chernova O., Kryvenko G.

Technological operations related to storage of liquefied hydrocarbon gases, draining, and filling of the rail and road tanks, cylinders are dangerous due to the high probability of explosions and fires, which lead to environmental pollution, injuries and deaths, cause significant material damage, affect the health of the population. During the operation of gas filling stations, their impact on the environment is not sufficiently taken into account, and the hazards associated with the specifics of their operation are assessed and analyzed.

Therefore, there is a need to conduct research on the impact of factors on emergencies that lead to fires, explosions and losses. The purpose of this work is to analyze the hazards at gas filling stations, taking into account a comprehensive study of the factors affecting them. The object of the study is a gas filling station designed to receive liquefied hydrocarbon gas from tanks, store it and release. The dangers of the object of study are due to the presence inside the equipment and pipelines of liquefied hydrocarbon gas in the gaseous and liquid state.

Quantitative indicators of explosion hazard are calculated. A comprehensive analysis of energy potential and level of danger to prevent accidents are carried out. According to the value of the relative energy potential and the mass of combustible gases, the category of explosion hazard is determined. The stages of development of the emergency situation during the operation of the tank are investigated.

The main danger of an accident with a tank is the possibility of a sudden release of large amounts of liquefied hydrocarbon gases. The results of scientific work in combination with other studies will make it possible to identify potential threats from explosions and fires at gas filling stations, which will allow us to develop measures to prevent harmful effects on the environment. *Key words:* liquefied hydrocarbon gas, gas filling station, tank, fire hazard, "fireball".

Постановка проблеми. Газонаповнювальні пункти віднесені до об'єктів, що становлять підвищену виробничу та екологічну небезпеку, яка пов'язана з використанням скраплених вуглеводневих газів (далі – СВГ) [1]. Технологічні операції зі зберігання скраплених вуглеводневих газів, зливання та заповнення залізничних і автомобільних цистерн, балонів є небезпечними з огляду високої ймовірності виникнення вибухів і пожеж, що призводять до забруднення навколишнього середовища, травм і загибелі людей, завдають значних матеріальних збитків, негативно впливають на здоров'я населення.

Актуальність дослідження та зв'язок авторського доробку з важливими науково-практичними завданнями. Під час експлуатації газонаповнювальних пунктів не досить враховується їх вплив на довкілля і оцінюються й аналізуються небезпеки, пов'язані зі специфікою їх роботи. Для забезпечення безпеки виробничого об'єкта необхідне проведення детального аналізу виникнення пожеж, вибухів, пов'язаних із технологічним середовищем, у випадку виникнення аварійних ситуацій. Це дасть змогу спрогнозувати сценарії розвитку аварій, що спричиняють негативний вплив на довкілля та змо-

жуть призвести до травмування й загибелі людей. Отже, розроблення критеріїв виникнення та розвитку аварійних ситуацій, їх запобігання та прогнозування наслідків аварій є актуальним.

Аналіз наслідків виникнення аварійних ситуацій на газонаповнювальних пунктах, які призводять до пожеж і вибухів, дасть змогу своєчасно провести необхідні заходи з попередження виникнення аварійних ситуацій. У цьому полягає практичне значення авторського доробку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Аналіз літературних джерел свідчить, що на розв'язання науково-практичних проблем екологічної безпеки спрямовані інтелектуальні зусилля багатьох учених. Проблеми забезпечення техногенно-екологічної безпеки потенційно небезпечних об'єктів, зокрема паливно-енергетичного комплексу, присвячено багато наукових робіт, серед яких чільне місце займають праці та дослідження І.І. Мазура, О.М. Іванцова, Р.М. Говдяка, Є.І. Крижанівського, Г.В. Кошлак, В.Ф. Стоєцького, Л.В. Дранишнікова та інших [2; 3; 4; 5].

З аналізу літературних джерел випливає, що виникнення аварійних ситуацій під дією техногенних чи антропогенних чинників може супроводжуватися загорянням СВГ і термічним впливом пожежі на довкілля, створенням пожежовибухової небезпеки. Небезпеки об'єкта дослідження зумовлені наявністю всередині обладнання і трубопроводів скрапленого вуглеводневого газу в газоподібному та рідкому стані.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. З джерел, присвячених проблемам екологічної безпеки, випливає, що існує необхідність у проведенні досліджень щодо впливу чинників на виникнення аварійних ситуацій, які призводять до пожеж і вибухів.

Метою роботи є аналіз небезпек на газонаповнювальних пунктах з урахуванням комплексного дослідження чинників, що впливають на них. Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі задачі досліджень:

- аналіз небезпек скраплених вуглеводневих газів;
- аналіз енергетичного потенціалу і рівня небезпеки об'єктів газонаповнювальних пунктів.

Об'єктом дослідження є газонаповнювальний пункт, призначений для приймання скрапленого вуглеводневого газу із залізничних цистерн і автоцистерн, зберігання і відвантаження СВГ. Предмет дослідження – чинники, що впливають на виникнення аварійних ситуацій.

Новизна та загальнонаукове значення. Новизна полягає у комплексному дослідженні чинників, які впливають на цей процес. Результати наукової роботи в комплексі з іншими дослідженнями дадуть змогу визначити потенційні загрози при вибухах

і пожежах на об'єктах газонаповнювальних пунктів, що дасть можливість розробити заходи із запобігання виникненню шкідливих впливів на довкілля.

Виклад основного матеріалу. Газонаповнювальний пункт призначений для приймання скрапленого вуглеводневого газу з автомобільних і залізничних цистерн, зберігання і відвантаження СВГ. На вузлі приймання відбувається зливання продукту з автомобільних і залізничних цистерн у стаціонарні підземні чи наземні резервуари.

Проведемо аналіз можливих аварій і їх наслідків на прикладі приймання скрапленого вуглеводневого газу з цистерн. Небезпеки на газонаповнювальному пункті зумовлені наявністю всередині обладнання і трубопроводів скрапленого вуглеводневого газу в газоподібному і рідкому станах.

За атмосферного тиску вуглеводневі гази не виявляють токсичної дії на організм людини. Потрапляючи в повітря, вони зменшують вміст кисню у ньому. Тому людина відчуватиме кисневе голодування, а за значних концентрацій скрапленого газу в повітрі може загинути від задухи. Вдихання протягом 10 хвилин повітря, яке містить 1% пропану або бутану, не викликає ніяких симптомів отруєння. Вдихання повітря, яке містить 10% пропану чи бутану, протягом 2 хвилин викликає запаморочення. У зв'язку з цим усі компоненти СВГ включені в список шкідливих для людського організму речовин. Санітарними нормами встановлена гранично допустима їх концентрація в повітрі робочої зони виробничих приміщень, яка дорівнює 300 мг/м³ (у перерахунку на вуглець) [6].

Пари СВГ у суміші з повітрям утворюють вибухонебезпечну суміш, але мають дуже низькі межі вибуховості. Відповідно за температури 0°C і тиску 760 мм рт. ст.: пропан – від 2,3 до 9,5%; *n*-бутан – від 1,5 до 8,4%; ізобутан – від 1,8 до 8,4% [7]. Внаслідок цього, а також дуже повільного розсіювання пари СВГ в атмосфері (через високу їх густину) суміш пари СВГ з повітрям протягом довгого часу є вибухонебезпечною.

Горіння суміші у цих умовах супроводжується нагріванням і розширенням газів, що призводить до швидкого підвищення тиску та руйнування будівельних конструкцій, а нагріті гази утворюють осередок пожежі. Під час вибуху газоповітряної суміші максимальний тиск може досягати 841,7 кПа, а швидкість розповсюдження полум'я – декількох сотень метрів за секунду. Людина сприймає це явище як швидкоплинне, миттєве. Незахищені металеві конструкції під дією такого тиску руйнуються через 15-20 хвилин [8]. Отже, небезпеки СВГ зумовлені більше вибухонебезпечними властивостями, ніж токсичними.

Розглянемо можливість виникнення аварійних ситуацій, що призводять до виникнення пожеж і вибухів, на прикладі цистерни. Цистерни відрізняються від технологічного обладнання тим, що вони

є транспортним засобом і при стоянці, русі та зливанні продукту існує небезпека мимовільного їх руху за інерцією. Неконтрольований рух цистерн із паливом небезпечний можливими зіткненнями і пошкодженнями цистерн, витіканням продукту. Основною небезпекою пошкодження цистерни є можливість залпового виливання великої кількості продукту.

Розглядаються такі стадії розвитку аварійної ситуації під час експлуатації цистерни: вихід тиску в цистерні за межі критичних значень; механічний і корозійний знос цистерни; помилки обслуговуючого персоналу; вплив зовнішніх факторів; порушення герметичності, перекидання цистерни; вилив і випаровування СВГ; утворення вибухо-пожежонебезпечної суміші; вибух і пожежа.

Розрахуємо показники вибухонебезпеки (вибух пароповітряної суміші) залізничної цистерни із СВГ місткістю 60 м³, а саме енергетичний і відносний енергетичний потенціал вибухонебезпеки, загальну приведену масу горючої пари та тротиловий еквівалент за методикою, наведеною в [9]. Ефективний енергозапас паливно-повітряної суміші визначається за такими залежностями:

$$E = m_2 \cdot q_2 \text{ при } c_2 \leq c_{cm}, \quad (1)$$

$$E = m_2 \cdot q_2 \cdot c_{cm} / c_2 \text{ при } c_2 > c_{cm}, \quad (2)$$

де m_2 – маса речовини, яка горить у хмарі, кг; q_2 – питома теплота згоряння палива, кДж/кг; c_{cm} – стехіометрична концентрація речовини у суміші з повітрям, кг/м³; c_2 – концентрація газу, що горить у хмарі, кг/м³.

При розрахунку параметрів вибуху хмари, які лежить на поверхні землі, величина ефективного енергозапасу подвоюється. За значеннями загальних енергетичних потенціалів вибухонебезпеки визначаються величини інших показників, які характеризують рівень вибухонебезпеки технологічних блоків.

Загальна маса горючих парів (газів) вибухонебезпечної парогазової хмари (m_2), приведена до єдиної питомої енергії згоряння, яка дорівнює 46 000 кДж/кг:

$$m_2 = \frac{E}{4,6 \cdot 10^4}, \quad (3)$$

Відносний енергетичний потенціал вибухонебезпеки

$$Q_0 = \frac{1}{16,534} \cdot \sqrt[3]{E}, \quad (4)$$

За значеннями відносних енергетичних потенціалів (Q_0) і приведеної маси парогазового середовища (m_2) здійснюється класифікація технологічних блоків.

Для оцінки рівня впливу вибуху на об'єкти необхідно знати масу речовини, що вибухнула. Однак кожна вибухова речовина має різні характеристики. Щоб зробити підхід до оцінки наслідків різних вибухів єдиним, прийнято це робити через тротиловий еквівалент. Тротиловий еквівалент є такою масою тротилу, при вибуху якої виділяється стільки ж енер-

гії, скільки й при вибуху заданої кількості конкретного пального або вибухової речовини. Тротиловий еквівалент:

$$W = \frac{0,4 \cdot m_2 \cdot q_e}{0,9 \cdot 4,5 \cdot 10^6}, \quad (5)$$

Розрахунок інтенсивності теплового випромінювання «вогняної кулі» q , кВт/м² проводять за методикою, наведеною в [10]:

$$q = E_f \cdot F_q \cdot \tau, \quad (6)$$

де E_f – середньповерхнева щільність теплового випромінювання полум'я, кВт/м²; F_q – кутовий коефіцієнт опромінення; τ – коефіцієнт пропускання атмосфери.

E_f визначають на основі наявних експериментальних даних. Допускається приймати E_f рівним 450 кВт/м². F_q розраховують за формулою:

$$F_q = \frac{H / D_s + 0,5}{4((H / D_s + 0,5)^2 + (r / D_s)^2)^{1,5}}, \quad (7)$$

де H – висота центру «вогняної кулі», м; D_s – ефективний діаметр «вогняної кулі», м; r – відстань від об'єкта, що опромінюється, до точки на поверхні землі безпосередньо під центром «вогняної кулі», м.

Ефективний діаметр «вогняної кулі»:

$$D_s = 5,33 m_2^{0,327}, \quad (8)$$

де m_2 – маса горючої речовини, кг.

H визначають у ході спеціальних досліджень. Допускається приймати $H = D_s / 2$. Час існування «вогняної кулі» t_s , с, дорівнює

$$t_s = 0,92 m_2^{0,303}, \quad (9)$$

Коефіцієнт пропускання атмосфери:

$$\tau = \exp(-7,0 \cdot 10^{-4} (\sqrt{r^2 + H^2} - D_s / 2)), \quad (10)$$

Надлишковий тиск Δp , кПа, що розвивається при згорянні газопароповітряних сумішей:

$$\Delta p = p_0 (0,8 m_{np}^{0,33} / r + 3 m_{np}^{0,66} + 5 m_{np} / r^3), \quad (11)$$

де p_0 – атмосферний тиск, кПа (допускається приймати рівним 101 кПа); r – відстань від геометричного центру газопароповітряної хмари, м; m_{np} – приведена маса газу або пари, кг.

m_{np} розраховується за формулою:

$$m_{np} = (q_2 / q_0) m_2 z, \quad (12)$$

де q_2 – питома теплота згоряння газу або пари, Дж/кг; z – коефіцієнт участі, який допускається приймати рівним 0,1; q_0 – константа, рівна $4,52 \cdot 10^6$ Дж/кг; m_2 – маса горючих газів і (або) парів, які вирвалися в результаті аварії у навколишній простір, кг.

Імпульс хвилі тиску I , Па·с:

$$I = 123 m_{np}^{0,66} / r. \quad (13)$$

Визначимо кількісні оцінки показників вибухонебезпеки (вибух пароповітряної суміші) залізничної цистерни із СВГ за таких даних: максимальний геометричний об'єм цистерни 60 м³ СВГ; ступінь заповнення цистерни складає 85%; температура навко-

Таблиця 1

Кількісна оцінка показників вибухонебезпеки

Найменування параметра	Одиниця вимірювання	Вибух пароповітряної суміші в результаті руйнування залізничної цистерни
Енергетичний потенціал вибухонебезпеки, E	кДж	$1,254 \cdot 10^9$
Відносний енергетичний потенціал вибухонебезпеки, Q_B	–	55,3
Загальна приведена маса горючої пари, m_{np}	кг	16 610
Троїловий еквівалент вибуху, W	кг	7578
r_1	м	75
r_2	м	110
r_3	м	188
r_4	м	550
r_5	м	1100

Таблиця 2

Кількісна оцінка показників вибухонебезпеки «вогняної кулі»

Висота центру, м	Ефективний діаметр, м	Інтенсивність теплового випромінювання q , кВт/м ²	Відстань від геометричного центра «вогняної кулі» до об'єкта r , м
75	150	4	395
		1,5	545

лишнього повітря – 20°C; теплота згорання СВГ 46 400 кДж/кг, концентрація пароповітряної суміші під час вибуху – 9,5%, густина теплового випромінювання полум'я $E_f = 450$ кВт/м². Результати розрахунків наведено в таблицях 1, 2.

У таблиці 1: r_1 – радіус зони повного руйнування будівель і смертельної небезпеки для людей, на межі якої надлишковий тиск по фронту ударної хвилі $\Delta p \geq 100$ кПа; r_2 – радіус зони сильних руйнувань будівельних конструкцій, обвалення цегляних стін і смертельної небезпеки для людей, $\Delta p = 70$ кПа; r_3 – радіус зони слабких руйнувань будівельних конструкцій, для відновлення яких потрібне їх часткове розбирання, і смертельної небезпеки для людей на відкритій місцевості, $\Delta p = 28$ кПа; r_4 – радіус зони слабких руйнувань (руйнування віконних отворів, покриттів, які легко розкидаються) і важкого травмування людей на відкритій місцевості, $\Delta p = 14$ кПа; r_5 – радіус зони часткового руйнування скління, нижній поріг ураження людей на відкритій місцевості, $\Delta p \leq 5$ кПа.

За значенням відносного енергетичного потенціалу та приведеної маси горючих газів визначена категорія вибухонебезпеки при аварії цистерни, заповненої скрапленим вуглеводневим газом. Вибух пароповітряної суміші в результаті руйну-

вання залізничної цистерни належить до 1 класу вибухонебезпеки.

Час існування «вогняної кулі», визначений за формулою (10), складає 20 с. При аварії кількість потерпілих прийнята за кількістю людей, які можуть знаходитися в зоні аварії (до 120 осіб). З аналізу результатів розрахунків, наведених у таблиці 2, випливає, що інтенсивність теплового випромінювання безпечна для людини на відстані $r = 395$ м від геометричного центра «вогняної кулі».

Головні висновки. Проведено комплексний аналіз енергетичного потенціалу і рівня небезпеки для запобігання аварійності. За значенням відносного енергетичного потенціалу та приведеної маси горючих газів визначена категорія вибухонебезпеки. Основною небезпекою аварії з цистерною є можливість залпового викиду великої кількості СВГ.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати наукових досліджень, викладені у цій статті, можуть слугувати основою для порівняльного аналізу під час вирішення питань безпечної експлуатації об'єктів, пов'язаних зі скрапленими вуглеводневими газами та забезпеченням охорони довкілля. Подальші дослідження передбачають комплексну оцінку технологічних втрат скраплених вуглеводневих газів на газонаповнювальних пунктах.

Література

1. Про об'єкти підвищеної небезпеки : Закон України від 18.01.2001 № 2245-III / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2245-14#Text> (дата звернення: 12.08.2020).
2. Мазур І.І., Іванцов О.М. Безопасность трубопроводных систем. М. : ИЦ «Елима», 2004. 1104 с.
3. Енергоекологічна безпека нафтогазових об'єктів / Р.М. Говдяк та інші. Івано-Франківськ : Лілея НВ, 2007. 556 с.
4. Крижанівський Є.І., Кошляк Г.В. Екологічні проблеми енергетики. *Нафтогазова енергетика*. 2016. № 1(25). С. 80–90.

5. Стоєцький В.Ф., Дранишников Л.В. Прогнозування наслідків аварій на потенційно небезпечних виробничих об'єктах. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2013. № 43. С. 114–122.
6. Семчук Я.М., Савчук Л.Я. Захист атмосферного повітря від забруднень. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2019. 198 с.
7. Рачевский Б.С. Сжиженные углеводородные газы. М. : Нефть и газ, 2009. 640 с.
8. Пожежна безпека об'єктів підвищеної небезпеки / О.П. Михайлюк та ін. Харків : УЦЗУ, 2010. 343 с.
9. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей: руководство по безопасности. Москва, 2015. Вып. 9. Сер. 27. 44 с.
10. ГОСТ Р 12.3.047-98. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/7/7077/index.htm> (дата звернення: 12.08.2020).