

## АНАЛІЗ НЕБЕЗПЕК ПІД ЧАС РОЗРИВУ АВТОЦИСТЕРНИ

О.Т. Чернова<sup>1</sup>, Г.М. Кривенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., доцент, завідувач кафедри газонафтопроводів та газонафтосховищ,  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Івано-Франківськ, Україна,  
ORCID ID: 0000-0002-6424-7569

<sup>2</sup>к.т.н., доцент, доцент кафедри техногенно-екологічної безпеки та охорони праці,  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Івано-Франківськ, Україна,  
ORCID ID: 0000-0001-5188-3032

### Анотація

**Вступ.** Автомобільний транспорт – один із найпоширеніших і найдо-ступніших видів транспорту в нашій країні. Для його нормальної та надійної роботи потрібне якісне паливо. Скраплений вуглеводневий газ є найдешев-шим доступним джерелом палива. Сьогодні автогазозаправні станції відне-сені до об'єктів підвищеної небезпеки. Тому виникла потреба в проведенні досліджень впливу чинників, що призводять до аварійних ситуацій. **Мета.** Метою роботи є аналіз небезпек під час розриву автоцистерни з урахуванням комплексного дослідження чинників, що впливають на них. Для досягнення поставленої мети сформульовані такі завдання: аналіз чинників, які впли-вають на виникнення аварійної ситуації під час проведення технологічних операцій з автоцистерною; кількісна оцінка параметрів ударної хвилі при вибухах паливно-повітряних сумішей. **Результати.** Проведено аналіз чинни-ків, що призводять до руйнування або порушення герметичності цистерни: підвищення тиску пари скрапленого вуглеводневого газу в цистерні до кри-тичного, механічний, корозійний знос і людський чинник. Рекомендовано пере-лік заходів для запобігання, локалізації аварії. Проаналізовано чинники, що пов'язані із залповим викидом великої кількості скраплених вуглеводневих газів. Проведено оцінку параметрів ударної хвилі та її наслідків у разі дорож-ньо-транспортної пригоди з автоцистерною зі скрапленим газом. За резуль-татами кількісної оцінки параметрів ударної хвилі визначено ймовірність ураження з використанням пробіт-функцій. **Висновки.** Наведені результати досліджень можуть використовуватися під час вирішення питань безпеч-ної експлуатації об'єктів, пов'язаних зі скрапленими вуглеводневими газами. Це дасть змогу визначити потенційні загрози при вибухах і пожежах на об'єктах автогазозаправних станцій і розробити заходи щодо запобігання виникненню шкідливих впливів на довкілля.

**Ключові слова:** скраплений вуглеводневий газ, автогазозаправна станція, ударна хвиля, надлишковий тиск, імпульс фази стиснення, чинники.

## DANGER ANALYSIS DURING A TANK BREAK

O.T. Chernova<sup>1</sup>, G.M. Kryvenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PhD in Technology, Associate Professor, Head of the Department Gas and Oil Pipelines and Storage Facilities,

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

*ORCID ID: 0000-0002-6424-7569*

<sup>2</sup>PhD in Technology, Associate Professor, Associate Professor of the Department “Technogenic, Environmental Technology and Labor Safety”,

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

*ORCID ID: 0000-0001-5188-3032*

### **Summary**

**Introduction.** Road transport is one of the most common and affordable modes of transport in our country. High-quality fuel is required for its normal and reliable operation. Liquefied petroleum gas is the cheapest available source of fuel. Nowadays, gas stations are classified as high-risk facilities. Therefore, there is a need to conduct research on the impact of factors that lead to emergencies. **Purpose.** The purpose of this work is to analyze the hazards during the rupture of the tanker, taking into account a comprehensive study of the factors affecting them. To achieve this goal, the following research objectives were formulated: analysis of factors influencing the occurrence of an emergency situation during technological operations with a tank truck; quantitative assessment of shock wave parameters during explosions of fuel-air mixtures. **Results.** The analysis of the factors leading to destruction or disturbance of tightness of the tank was carried out: increase of steam pressure of the liquefied petroleum gas in the tank to critical value mechanical, corrosion wear and the human factor. The list of measures for the prevention, localization of accident was recommended. Factors related to the volley release of large amounts of liquefied petroleum gases were analyzed. The shock wave parameters and their consequences in the event of a traffic accident with a liquefied gas tanker were assessed. Based on the results of the quantitative evaluation of the shock wave parameters, the probability of damage was determined using probit functions. **Conclusions.** These research results can be used to address the safe operation of liquefied petroleum gas facilities. This will make it possible to identify potential threats from explosions and fires at gas stations and to develop measures to prevent harmful effects on the environment.

**Key words:** liquefied petroleum gas, gas station, shock wave, gage pressure, compression phase momentum, factors.

**Вступ.** Увійшовши в еру передових технологій, людина вже не уявляє свого існування без користування технікою, яка значно полегшує умови життя та праці. Якісна робота транспорту може бути здійснена тільки при використанні якісного палива. У наш час найпоширенішими видами палива є бензин, дизельне паливо, мазут та інші альтернативні види енергії, але особливе місце займає скраплений вуглеводневий газ, що є найбільш доступним нині.

Потрібно відмітити, що кожна автогазозаправна станція (далі – АГЗС) є джерелом викиду забруднюючих речовин. При цьому за останні роки суттєво

збільшилася кількість АГЗС, розташованих у приміській смузі, житлових кварталах, безпосередньо біля великих торгових і розважальних комплексів. Кількість АГЗС, що постійно зростає, а також об'єми транспортування автоцистернами газового палива передбачають необхідність детального підходу до вивчення їх впливу на навколишнє середовище. Це дасть змогу спрогнозувати, які чинники, що пов'язані з виникненням аварійних ситуацій, спричиняють негативний вплив на довкілля та зможуть призвести до травмування й загибелі людей. Отже, дослідження чинників, що призводять до виникнення аварійних ситуацій, а також запобігання наслідкам і прогнозування наслідків аварій є актуальним.

**Постановка проблеми.** Сьогодні АГЗС віднесені до об'єктів підвищеної небезпеки [1], адже зберігання скраплених вуглеводневих газів, зливання з автомобільних цистерн і заповнення балонів є небезпечними. Недотримання вимог безпечної експлуатації може призвести до виникнення вибухів і пожеж, які є причиною забруднення навколишнього середовища, травм і загибелі людей.

Варто звернути увагу, що під час аварії із цистерною можливий залповий викид великої кількості скраплених вуглеводневих газів, що є особливо небезпечним. Тому необхідно провести детальний аналіз, які чинники впливають на виникнення пожеж, вибухів, пов'язаних із технологічним середовищем – скрапленим вуглеводневим газом, у випадку виникнення аварійних ситуацій. Це дасть змогу провести необхідні заходи та зменшити ймовірність виникнення небезпечних ситуацій. У цьому полягає практичне значення авторського доробку.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Багато наукових робіт присвячено проблемі забезпечення безпеки, серед яких варто відмітити праці та дослідження Б.С. Рачевського, І.І. Мазура, О.М. Іванцова, Й.Й. Білинського, В.Ф. Стоєцького й інших [2; 3; 4; 5].

Так, у працях [6; 7] зазначено, що в разі відмови потенційно небезпечних об'єктів ударна хвиля є одним із чинників, що уражають, але недостатньо оцінюються й аналізуються небезпеки, пов'язані зі специфікою технологічних операцій зі скрапленими вуглеводневими газами. Варто звернути увагу, що залповий викид великої кількості скраплених вуглеводневих газів є основною небезпекою під час аварії із цистерною [8]. Тому потрібно проаналізувати вплив чинників на виникнення ударної хвилі у випадку аварій, що може призвести до значних збитків.

**Формулювання цілей статті.** Метою роботи є аналіз небезпек під час розриву автоцистерни з урахуванням комплексного дослідження чинників, що впливають на них. Для досягнення поставленої мети сформульовані такі завдання досліджень:

- аналіз чинників, які впливають на виникнення аварійної ситуації під час проведення технологічних операцій з автоцистерною;
- кількісна оцінка основних параметрів ударної хвилі при вибухах паливно-повітряних сумішей.

Новизна полягає в комплексному дослідженні чинників, що впливають на формування ударної хвилі при вибухах. Результати наукової роботи дадуть змогу вчасно розробити заходи щодо запобігання виникненню шкідливих впливів на довкілля, визначивши потенційні загрози при вибухах і пожежах на об'єктах АГЗС.

**Виклад основного матеріалу.** АГЗС призначена для приймання скрапленого вуглеводневого газу з автомобільних цистерн, його зберігання та відпуску. На вузлу приймання відбувається зливання скрапленого газу з автомобільних цистерн у стаціонарні резервуари. Проведемо аналіз можливих аварійних ситуацій і їх наслідків на прикладі приймання скрапленого вуглеводневого газу із цистерн. Небезпеки на АГЗС зумовлені наявністю усередині обладнання і трубопроводів технологічного середовища, що характеризується більше вибухопожежонебезпечними властивостями, ніж токсичними [9].

Технологічні операції зі скрапленими вуглеводневими газами є небезпечними, оскільки є висока ймовірність виникнення вибухів і пожеж, що призводять до забруднення навколишнього середовища, травм і загибелі людей, завдають значних матеріальних збитків, негативно впливають на здоров'я населення. Проаналізуємо, які чинники впливають на виникнення аварійної ситуації під час проведення технологічних операцій з автоцистерною. Одним із основних чинників, що призводить до руйнування або порушення герметичності цистерни, є підвищення тиску пари скрапленого вуглеводневого газу в цистерні до критичного. Таке підвищення тиску може відбуватися за підвищення температури в цистерні. Стан внутрішньої поверхні резервуара автоцистерни характеризується такими чинниками: механічним і корозійним зносом. Значну роль відіграє й людський чинник, адже помилки обслуговуючого персоналу можуть призвести до транспортної аварії з руйнуванням резервуара цистерни, вибуху або пожежі. Аварії транспортного характеру, що можуть призвести до порушення герметичності цистерни й витікання скрапленого вуглеводневого газу, також залежать від зовнішніх чинників.

Для запобігання, локалізації аварії потрібно проводити такі заходи:

- дотримання вимог безпечної експлуатації цистерни;
- у випадку підвищення тиску в цистерні до критичного терміново вжити заходи щодо охолодження;
- моніторинг стану внутрішньої поверхні резервуара автоцистерни з використанням необхідних методів контролю;
- захист території від небезпечної дії атмосферних чинників (блискавкозахист);
- періодична перевірка знань персоналу, навчання і стажування нових працівників;
- проведення навчальних тренінгів.

У випадку вилиття скрапленого вуглеводневого газу його локалізація не передбачена. Зменшити швидкість випаровування вилитого скрапленого вуглеводневого газу, а також локалізувати утворену вибухонебезпечну хмару є технічно неможливо. Вищенаведене підкреслює, що недотримання безпечних умов експлуатації цистерн може призвести до значного забруднення довкілля, негативного впливу на здоров'я населення.

Проведемо оцінку параметрів ударної хвилі та її наслідків у разі дорожньо-транспортної пригоди з автоцистерною зі скрапленим газом. Для кількісної оцінки параметрів повітряної ударної хвилі при вибухах паливно-повітряних сумішей (ППС) розглядається часткова розгерметизація або повне руйнування обладнання, що містить горючу речовину в газоподібній або рідкій фазі. Припустимо, що в результаті аварії стався розрив автоцистерни зі скрапленим вуглеводневим газом, тобто повне руйнування.

Оскільки надлишковий тиск повітряної ударної хвилі й імпульс фази стиснення є основними чинниками, що впливають на ймовірність руйнувань промислових будівель і травмування повітряною хвилею людини, то розглянемо їх вплив при повному руйнуванні автоцистерни.

Визначимо параметри повітряної ударної хвилі, а саме: надлишковий тиск та імпульс фази стиснення на відстані 100 м від місця аварії згідно з методикою, наведеною в праці [10]. Для оцінки можливих наслідків приймаємо, що в результаті викиду газу в межах займання вилитося все паливо, що знаходилося в цистерні. Займання хмари призвело до вибуху. Маса горючого газу  $M_z=10$  т, питома теплота згоряння палива  $q_z=4,64 \cdot 10^7$  Дж/кг; середня концентрація газу  $c_z=150$  г/м<sup>3</sup>, стехіометрична концентрація речовини в суміші з повітрям  $c_{cm}=0,077$  кг/м<sup>3</sup>; швидкість полум'я  $v_z=200$  м/с; швидкість звуку в повітрі  $C_0=340$  м/с; ступінь розширення продуктів згоряння  $\sigma=7$ .

Надлишковий тиск повітряної ударної хвилі визначається за залежністю:

$$\Delta p = p_x \cdot p_0, \quad (1)$$

де  $p_x$  – безрозмірний тиск;

$p_0$  – атмосферний тиск, Па.

Імпульс фази стиснення дорівнює:

$$I = I_x \cdot (p_0)^{2/3} \cdot E^{1/3} / C_0 \quad (2)$$

де  $I_x$  – безрозмірний імпульс фази стиснення;

$E$  – ефективний енергетичний запас паливно-повітряної суміші, Дж;

$C_0$  – швидкість звуку в повітрі, м/с.

Безрозмірний тиск  $p_x = \min(p_{x_1}, p_{x_2})$ .

$$p_{x_1} = \left( \frac{v_z^2}{C_0^2} \right) \cdot \left( \frac{\sigma - 1}{\sigma} \right) \cdot \left( \frac{0,83}{R_x} - \frac{0,14}{R_x^2} \right), \quad (3)$$

де  $v_z$  – швидкість полум'я, м/с;

$\sigma$  – ступінь розширення продуктів згоряння;

$R_x$  – безрозмірна відстань від центра хмари ППС.

$$p_{x_2} = \exp(-1,124 - 1,66 \ln R_x + 0,26 (\ln R_x)^2). \quad (4)$$

Безрозмірний імпульс фази стиснення:

$$I_x = \min(I_{x_1}, I_{x_2}). \quad (5)$$

$$I_{x_1} = \left( \frac{v_z}{C_0} \right) \cdot \left( \frac{\sigma - 1}{\sigma} \right) \cdot \left( 1 - 0,4 \cdot \left( \frac{\sigma - 1}{\sigma} \right) \cdot \left( \frac{v_z}{C_0} \right) \right) \cdot \left( \frac{0,06}{R_x} + \frac{0,01}{R_x^2} - \frac{0,0025}{R_x^3} \right). \quad (6)$$

$$I_{x_2} = \exp(-3,4217 - 0,898 \ln R_x - 0,0096 (\ln R_x)^2). \quad (7)$$

Ефективний енергетичний запас паливно-повітряної суміші – це один із основних параметрів вибуху ППС. Величина ефективного енергетичного запасу подвоюється при розрахунку параметрів вибуху хмари ППС, що лежить на поверхні землі.

Ефективний енергетичний запас паливно-повітряної суміші при  $c_2 > c_{cm}$  визначається за такою залежністю:

$$E = 2 \cdot M_2 \cdot q_2 \cdot c_{cm} / c_2, \quad (8)$$

де  $M_2$  – маса речовини, що горить, у хмарі, кг;

$q_2$  – питома теплота згоряння палива, кДж/кг;

$c_{cm}$  – стехіометрична концентрація речовини в суміші з повітрям, кг/м<sup>3</sup>;

$c_2$  – концентрація газу, що горить у хмарі, кг/м<sup>3</sup>.

Для заданої відстані  $r = 100$  м безрозмірна відстань  $R_x$  від центра хмари ППС:

$$R_x = r / (E / p_0)^{1/3}, \quad (9)$$

де  $r$  – відстань від місця аварії.

Знайшовши безрозмірні величин  $P_x$  і  $I_x$ , обчислюємо за залежностями (1) і (2) надлишковий тиск та імпульс фази стиснення повітряної ударної хвилі на відстані 100 м від місця аварії при швидкості горіння 200 м/с.

За результатами розрахунків надлишковий тиск повітряної ударної хвилі  $\Delta p = 2,9 \cdot 10^4$  Па. Імпульс фази стиснення  $I = 2,05 \cdot 10^4$  Па·с.

Визначимо ймовірність нанесення збитків довкіллю та травмування людей за допомогою пробіт-функцій. При цьому розглянемо ймовірність пошкоджень стін промислових будівель, що підлягають їх відновленню без їх знесення, і ймовірність руйнувань промислових будівель, під час яких будівлі підлягають знесенню. Визначимо ймовірність травмування повітряною хвилею людини, а саме: імовірність втрати людьми орієнтації в просторі; розриву барабанних перетинків у людей і відкидання людей хвилею тиску. Отримано такі значення пробіт-функцій:  $Pr_1 = 6,77$ ,  $Pr_2 = 4,44$ ,  $Pr_3 = -1,90$ ,  $Pr_4 = 3,06$ ,  $Pr_5 = -2,82$ .

За розрахованими величинами пробіт-функції, згідно з таблицею, наведеною в праці [10], визначено ймовірність ураження. Імовірність пошкоджень промислових будівель становить 90%, руйнувань промислових будівель – 28%, розриву барабанних перетинків у людей – 2,5%. Імовірності інших критеріїв ураження близькі до нуля.

**Висновки.** Проведено аналіз чинників, які впливають на виникнення аварій, пов'язаних із залповим викидом великої кількості скраплених вуглеводневих газів. За результатами кількісної оцінки параметрів ударної хвилі при вибухах паливно-повітряних сумішей визначено з використанням пробіт-функцій імовірність збитків. Наведені результати досліджень можуть використовуватися під час вирішення питань безпечної експлуатації об'єктів, пов'язаних зі скрапленими вуглеводневими газами. Це дасть змогу визначити потенційні загрози при вибухах і пожежах на об'єктах автогазозаправних станцій і розробити заходи щодо запобігання виникненню шкідливих впливів на довкілля. Подальші дослідження передбачають комплексну оцінку технологічних утрат скраплених вуглеводневих газів під час їх зберігання на автогазозаправних станціях.

## 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>.

2. Рачевский Б.С. Сжиженные углеводородные газы. Москва : Нефть и газ, 2009. 640 с.
3. Мазур И.И., Иванцов О.М. Безопасность трубопроводных систем. Москва : ИЦ «Елима», 2004. 1104 с.
4. Скрапленый газ в энергетическом комплексе Украины / Й.Й. Білинський, О.А. Гордієнко, Т.С. Тітов, О.М. Сахно. *Вісник ВПІ*. 2018. № 4. С. 54–60.
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. Михайлюк О.П. Проблеми забезпечення пожежовибухонебезпеки автозаправних станцій. *Проблеми пожежної безпеки* : збірник наукових трудов НУЦЗУ. 2012. Вып. 32. С. 149–154.
7. Тарнавський А.Б. Оцінка уражаючих факторів при вибуху кисневого балона. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2014. № 9. С. 174–179.
8. Kryvenko G.M. Forecasting of Danger during a Tank Rapture. *Перспективні напрями наукових досліджень* : матеріали LV Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Львів, 24 листопада 2020 року). Львів, 2020. Ч. 2. С. 72–75.
9. Чернова О.Т., Кривенко Г.М. Аналіз небезпек на газонаповнювальних пунктах. *Екологічні науки* : науково-практичний журнал. 2020. Вип. 4 (31). С. 120–124.
10. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей : руководство по безопасности. Москва, 2015. Вып. 9. Сер. 27. 44 с.

#### REFERENCES

1. On high-risk objects [Pro obiekty pidvyshchenoi nebezpeky]. Law of Ukraine of January 18, 2001 № 2245-III / The Verkhovna Rada of Ukraine. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2245-14#Text> [in Ukrainian].
2. Rachevskiy B. S.(2009). Liquefied petroleum gases [Szhizhennyye uglevodorodnyie gazyi]. M. Oil and Gas. 640 [in Russian].
3. Mazur I. I., Ivantsov O. M. (2004). Safety of pipeline systems. [Bezopasnost truboprovodnyih sistem]. 1104 [in Russian].
4. Bilynskiy Y. Y., Hordiienko O. A., Titov T. S., Sakhno O. M. (2018). *Liquefied gas in the energy complex of Ukraine* [Skraplenyi haz v enerhetychnomu kompleksi Ukrainy]. Bulletin of VPI. 4. 54–60 [in Ukrainian].
5. Stoietskiy V. F., Dranyshnikov L. V. (2013). *Forecasting the consequences of accidents at potentially dangerous production facilities*. [Prohnozuvannia naslidkiv avarii na potentsiino nebezpechnykh vyrobnychykh ob'ektakh]. Collection of scientific works of the National Mining University. 43. 114–122 [in Ukrainian].
6. Mykhailiuk O. P. (2012) *Problems of providing fire and explosion danger of gas stations*. [Problemy zabezpechennia pozhezhovybukhonebezpeky

- avtozapravnykh stantsii]. Collection of scientific works of NUTSZU Problems of fire safety. 32. 149–154 [in Ukrainian].
7. Tarnavskiy A. B. (2014). *Assessment of damaging factors in the explosion of an oxygen cylinder* [Otsinka urazhaiuchykh faktoriv pry vybukhu kysnevoho balona]. Bulletin of Lviv State University of Life Safety. 9. 174–179 [in Ukrainian].
  8. Kryvenko G. M. (2020). *Forecasting of Danger during a Tank Repture*. Promising areas of research, LV International scientific-practical Internet conference. Lviv. 2. 72–75.
  9. Chernova O. T., Kryvenko G. M. (2020). *Hazard Analysis at Gas Filling Stations*. [Analiz nebezpek na hazonapovniuvalnykh punktakh]. Ecological sciences: scientific and practical journal. 4 (31), 120–124 [in Ukrainian].
  10. *Methods for Assessing the Consequences of Emergency Explosions of Fuel-Air Mixtures*. (2015). [Metodika otsenki posledstviy avariynyih vzryivov toplivno-vozdushnyih smesey]. Safety Guide. 9(27). 44 [in Russian].