

*Ю.Е. Павлюк, канд. техн. наук, доцент, Н.О. Ференц, канд. техн. наук, доцент
(Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)*

ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ УДАРНОЇ ХВИЛІ ПРИ ВИБУХУ ТИПУ BLEVE У РЕЗЕРВУАРАХ ІЗ СКРАПЛЕНИМИ ВУГЛЕВОДНЕВИМИ ГАЗАМИ

Проведено оцінку параметрів ударної хвилі при вибуху типу BLEVE у резервуарах із скрапленими вуглеводневими газами. Приведено блок-схему для розрахунку параметрів хвилі тиску при вибуху резервуара з скрапленим газом при впливі на нього осередку пожежі. Встановлено залежність надлишкового тиску вибуху та імпульсу ударної хвилі при вибуху вуглеводнів різного складу від відстані від епіцентру вибуху. Показано наслідки виникнення BLEVE для персоналу і для будівель. Обчислено безпечну відстань при виникненні BLEVE у резервуарах із скрапленими вуглеводневими газами.

Ключові слова: скраплені вуглеводневі гази, BLEVE, вибухонебезпека, тиск вибуху, імпульс хвилі

Актуальність проблеми

На даний час в Україні за різними оцінками використовується щорічно від 750000 до 810000 т скрапленого вуглеводневого газу (СВГ). У деяких країнах СВГ використовують з 1940 року як альтернативне паливо для двигунів з іскровим запалюванням. Вражає попит на скраплений газ в світі: так, наприклад, у 2010 році об'єми світового споживання скрапленого газу становили 240 млн. тонн, а це 15% сукупного споживання газоподібних вуглеводнів [1].

Скраплені вуглеводневі гази – суміш скраплених під тиском легких вуглеводнів з температурою кипіння від -50 до 0 °С. Основними компонентами СВГ є пропан, пропілен, ізобутан, ізобутилен, н-бутан, бутілен. Такі вуглеводні за нормальних умов знаходяться в газоподібному стані, а при відносно невеликому підвищенні тиску (без зниження температури) переходять в рідкий стан. Це дає можливість перевозити і зберігати скраплені газоподібні вуглеводні як рідини та контролювати, регулювати і спалювати як гази. Перевагою скраплених вуглеводневих газів є низька токсичність, відсутність корозії і тетраетилсвинцю у викидах, високе октанове число (102...108) [1].

Виробництва, де обертаються вуглеводневі гази та об'єкти їх зберігання, традиційно характеризуються підвищеною пожежною небезпекою [2]. Це пов'язано з фізико-хімічними властивостями цих газів, які обумовлюють показники їх вибухопожежонебезпеки, з можливістю утворення вибухопожежонебезпечних газоповітряних сумішей у резервуарах і технологічних ємностях, з особливостями технології виробництва – підвищений тиск і температура, можливість витоків, наявність потенційних джерел запалювання тощо, та з великими об'ємами їх зберігання. Пожежі на об'єктах з наявністю вуглеводневих газів, мають, як правило, ланцюговий характер розвитку, є складними, важко піддаються гасінню, завдають значних матеріальних збитків і шкоди навколишньому середовищу, становлять загрозу життю та здоров'ю людей. З огляду на вищевказане, важливого значення набуває питання оцінки вибухонебезпеки резервуарів зі скрапленими вуглеводневими газами.

Метою роботи є оцінка параметрів ударної хвилі при вибуху типу BLEVE у резервуарах із скрапленими вуглеводневими газами.

Для забезпечення процесу використання скраплених вуглеводневих газів необхідно враховувати ряд особливостей газоподібних вуглеводнів, що входять до їх складу. Зокрема, при невеликому тиску вони легко переходять в рідкий стан, тому їх зберігають, транспортують, розподіляють і використовують під тиском власної пари. У газоподібному стані вони значно важчі за повітря; їх відносна густина за відношенням до повітря знаходиться в межах

1,5... 2,1, що зумовлює безпечну експлуатацію систем газопостачання. В'язкість СВГ дуже мала, що полегшує транспортування, однак сприяє витокам. Коефіцієнт об'ємного розширення скраплених газів дуже великий, тому при заповненні резервуарів скрапленими газами залишають вільний простір (15% місткості резервуара) [3].

На об'єктах, де зберігаються і переробляються скраплені вуглеводневі гази, можливі такі види аварій:

- вибухи газових хмар на відкритому просторі;
- утворення і поширення вибухонебезпечних хмар газу;
- згоряння газової хмари у вигляді «вогняної кулі»;
- пожежі розливів;
- вибух парів закипаючої рідини, які розширюються.

При потраплянні замкнутого резервуара із скрапленим газом в осередок пожежі відбувається нагрівання вмісту резервуара до температури, яка значною мірою перевищує нормальну температуру кипіння, із відповідним підвищенням тиску. У випадку розриву резервуара (при ударі, внаслідок корозії або через нагрівання його незмочених стінок і зменшення межі міцності їх матеріалу), відбувається вибух.

Вибух парів закипаючої рідини, які розширюються, – тип вибуху резервуара з рідиною, що знаходиться під тиском. Такий вибух позначається акронімом BLEVE – з англ. Boiling liquid expanding vapour explosion. Вибух цього типу відбувається при руйнуванні резервуара, що містить рідину, яка нагріта вище температури кипіння при атмосферному тиску (перегріту рідину).

Схема утворення BLEVE у резервуарі зі скрапленими вуглеводневими газами зображена на рис. 1.

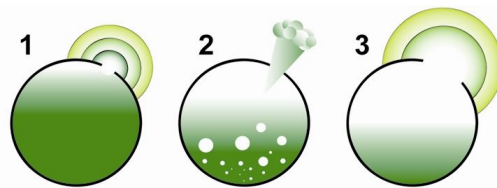


Рис. 1. Схема утворення BLEVE у резервуарі зі скрапленими вуглеводневими газами:

1 – розрив резервуара, утворення первинної хвилі тиску, падіння тиску в резервуарі; 2 – кипіння СВГ, активне випаровування, створення другої хвилі тиску; 3 – повне руйнування резервуара, змішування газової хмари з повітрям

Вибух відбувається за такою схемою [4]:

1) газова фаза вивільняється, створюючи хвилю тиску (детонацію) зовні резервуара; тиск всередині ємності різко падає;

2) падіння тиску переводить рідину у перегрітий стан, рідка фаза починає активно і неконтрольовано кипіти (щоб компенсувати падіння тиску); кількість газу, що вивільняється, переповнює резервуар (газ не встигає вийти через отвір, що утворився);

3) відбувається повний розрив резервуара, що створює другу хвилю тиску (набагато потужнішу, ніж перша), яка супроводжується розкиданням металевих конструкцій.

Можливість виникнення BLEVE для конкретної речовини, яка зберігається у замкнутому резервуарі, визначають таким чином. Розраховують δ за формулою [5]:

$$\delta = C_p \cdot (T - T_{кин}) / L, \quad (1)$$

де C_p – питома теплоємність рідкої фази, Дж/кг;

T – температура рідкої фази, яка відповідає температурі насиченої пари при тиску спрацювання запобіжного клапана, К;

$T_{кин}$ – температура кипіння речовини при нормальному тиску, К;

L – питома теплота випаровування при нормальній температурі кипіння $T_{\text{кип}}$, Дж/кг.

Якщо $\delta < 0,35$, то BLEVE не відбувається. При $\delta > 0,35$ ймовірність виникнення цього явища велика.

Розрахунок параметрів хвилі тиску при вибуху резервуара зі скрапленим газом від впливу на нього осередку пожежі здійснювався згідно з [5] за узагальненою схемою (рис.2). В блок-схемі прийняті такі умовні позначення: ΔP – надлишковий тиск вибуху, кПа P_0 – атмосферний тиск, кПа; $m_{\text{пр}}$ – приведена маса газу, кг, r – відстань від геометричного центра газоповітряної хмари, м; m – маса газу, задіяна у вибуху, кг; Q_0 – константа, дорівнює $4,52 \cdot 10^6$ Дж/кг; i – імпульс хвилі тиску, Па·с; V – об'єм резервуара, м³; ρ – густина рідкої фази, кг/м³; ε – ступінь заповнення резервуара; C_p – питома теплоємність рідкої фази, Дж/кг; T – температура рідкої фази, К; $T_{\text{кип}}$ – температура кипіння речовини, К; L – питома теплота випаровування при температурі кипіння $T_{\text{кип}}$, Дж/кг; $E_{\text{іе}}$ – енергія, яка виділяється при ізентропічному розширенні середовища, Дж; $C_{\text{еф}}$ – константа, $C_{\text{еф}} = 500$ Дж/(кг(К)); A, B, C_a – константи Антуана; $P_{\text{к}}$ – тиск спрацювання запобіжного клапана, кПа.

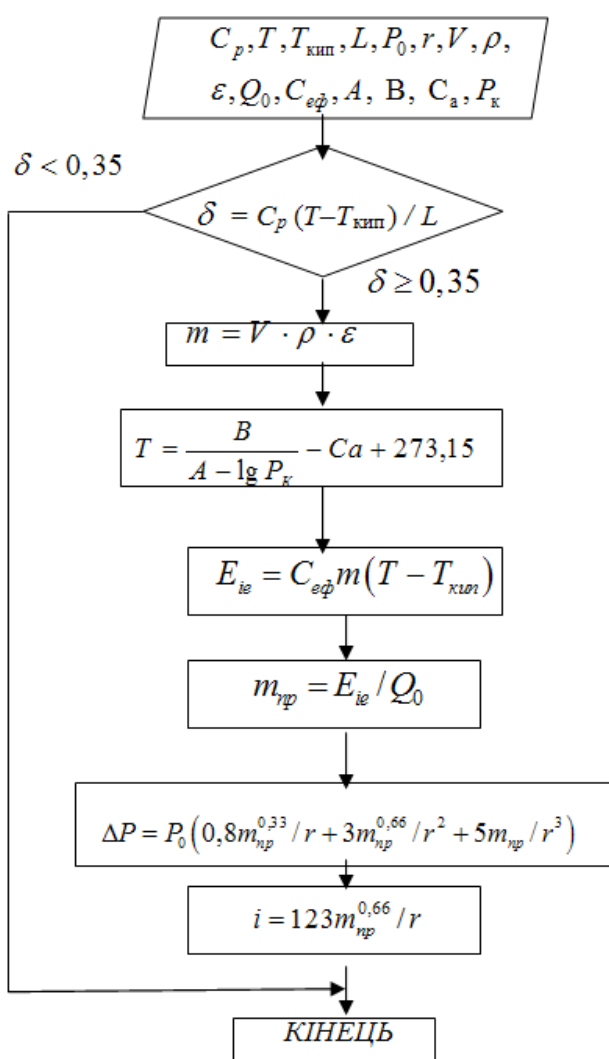


Рис.2. Блок-схема для розрахунку параметрів хвилі тиску при вибуху резервуара з зрідженим газом при впливі на нього осередку пожежі

Параметри ударної хвилі – надлишковий тиск, який утворюється при згорянні газової фази, та імпульс хвилі тиску, розраховані згідно з блок-схемою (рис.2) для пентану, бутану, ізобутану, пропілену та пропану наведені у таблиці 1. В розрахунках прийнято: $V_{рез} = 200 \text{ м}^3$, $\varepsilon = 0,64$; тиск спрацювання запобіжного клапана 2,0 МПа, константи Антуана, густина рідкої фази, температури кипіння речовини згідно з [6].

Таблиця 1

Параметри ударної хвилі при вибуху типу BLEVE у резервуарах із скрапленими вуглеводневими газами при впливу на них осередку пожежі*

Вид скрапленого вуглеводневого газу	Відстань від епіцентру вибуху, r, м						
	10	20	30	40	50	80	100
Пентан	<u>1008,8</u>	<u>197,7</u>	<u>86,1</u>	<u>50,5</u>	<u>34,5</u>	<u>16,6</u>	<u>12,2</u>
	1181,4	591	393,8	295,4	236,3	147,7	118,1
Бутан	<u>867,6</u>	<u>174,0</u>	<u>76,5</u>	<u>45,1</u>	<u>31,6</u>	<u>15,3</u>	<u>11,3</u>
	1168,6	584,3	398,6	292,2	233,7	146,1	116,9
Ізобутан	<u>829,1</u>	<u>166,9</u>	<u>74,1</u>	<u>43,7</u>	<u>30,3</u>	<u>14,9</u>	<u>10,9</u>
	1126,0	563,0	375,4	281,5	225,2	140,8	112,6
Пропілен	<u>759,4</u>	<u>155,7</u>	<u>69,4</u>	<u>41,5</u>	<u>28,8</u>	<u>14,1</u>	<u>10,5</u>
	1050,4	525,2	350,2	262,6	210,1	131,3	105,1
Пропан	<u>690,9</u>	<u>143,3</u>	<u>64,5</u>	<u>38,9</u>	<u>26,8</u>	<u>13,5</u>	<u>9,9</u>
	973,2	486,6	324,4	243,3	194,6	121,7	97,3

*Примітка. У чисельнику приведено надлишковий тиск, ΔP , кПа; у знаменнику – імпульс ударної хвилі тиску, i , Па·с.

Як показано у таблиці, при вибуху газоповітряних сумішей надлишковий тиск вибуху та імпульс ударної хвилі тиску будуть зменшуватися в ряду пентан > бутан > ізобутан > пропілен > пропан. Однак, вказана закономірність спостерігається на відстані до 20 м від епіцентру вибуху, на більшій відстані – параметри ударної хвилі практично не залежать від виду скраплених вуглеводневих газів.

У блок-схемі (рис. 2) показано, що температура рідкої фази відповідає температурі насиченої пари при тиску спрацювання запобіжного клапана. Із зростанням тиску спрацювання запобіжного клапана збільшується енергія, яка виділяється при ізентропічному розширенні середовища, яке знаходиться в резервуарі, зростає приведена маса газу, що призводить до збільшення тиску вибуху та імпульсу хвилі тиску. Таким чином, вибираючи запобіжний клапан, можна регулювати тиск вибуху резервуара із скрапленим газом в осередку пожежі.

Проведемо оцінку наслідків аварії для будівель і персоналу. При вибуху пропаноповітряної суміші повне руйнування будівель буде спостерігатися на відстані до 23 м від епіцентру вибуху, пошкодження деяких конструктивних елементів – на відстані від 23 м до 165 м. Наслідки аварії для персоналу будуть такими – радіус зони ураження зі смертельним наслідком – 23 м, радіус зони ураження з травмами – 55м. Безпечна відстань становить 144 м.

Висновок. Проведено оцінку параметрів ударної хвилі при вибуху типу BLEVE у резервуарах із скрапленими вуглеводневими газами. При вибуху газоповітряних сумішей надлишковий тиск вибуху та імпульс ударної хвилі тиску будуть зменшуватися в ряду пентан>бутан>ізобутан>пропілен>пропан. Однак, вказана закономірність спостерігається на відстані до 20 м від епіцентру вибуху, на більшій відстані – параметри ударної хвилі практично не залежать від виду скраплених вуглеводневих газів.

Список літератури:

1. **Zhang, Chunhua;** Bian, Yaozhang; Si, Lizeng; Liao, Junzhi; Odbileg, N (2005). "A study on an electronically controlled liquefied petroleum gas-diesel dual-fuel automobile". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering 219 (2): 207. doi:10.1243/095440705X6470.
2. **Обеспечение** пожарной безопасности объектов хранения и переработки СУГ: Рекомендации. – М: ВНИИПО, 1999. – 156 с.
3. **Справочник** по сжиженным углеводородным газам. – Л.: Недра, 1986. – 543 с.
4. **Якуш С.Е.** Гидродинамика и горение газовых и двухфазных выбросов в открытой атмосфере: Диссертация ... доктора физико-математических наук : 01.02.05. – Москва, 2000. – 336 с.
5. **ГОСТ Р 12.3.047-98.** Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования.
6. **Пожаровзрывоопасность** веществ и материалов и средства их тушения: Справочник под ред. А.Н. Баратова, А.Я. Корольченко, Г.Н. Кравчука и др. – М: Химия, 1990.

Ю.Э. Павлюк, Н.А. Ференц

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПРИ ВЗРЫВЕ ТИПА BLEVE В РЕЗЕРВУАРАХ С СЖИЖЕННЫМИ УГЛЕВОДОРОДНЫМИ ГАЗАМИ

Проведена оценка параметров ударной волны при взрыве типа BLEVE в резервуарах с сжиженными углеводородными газами. Приведено блок-схему для расчета параметров волны давления при взрыве резервуара с сжиженным газом при влиянии на него очага пожара. Установлена зависимость избыточного давления взрыва и импульса ударной волны при взрыве углеводородов различного состава от расстояния от эпицентра взрыва. Показаны последствия возникновения BLEVE для персонала и для зданий. Вычислено безопасное расстояние при возникновении BLEVE в резервуарах с сжиженными углеводородными газами.

Ключевые слова: сжиженные углеводородные газы, BLEVE, взрывоопасность, давление взрыва, импульс волны

Yu.E. Pavluk, N.O. Ferents

ESTIMATION OF ORIGIN OF THE BLEVE-TYPE EXPLOSION IN RESERVOIRS WITH LIQUEFIED PETROLEUM GASES

Possibility of origin of the BLEVE-type explosion in reservoirs with liquefied petroleum gases is analyzed. A flow-chart is suggested to calculate parameters of pressure wave at the explosion of reservoir with liquefied petroleum gases taking into account the influence of center of conflagration. Dependence of surplus explosion pressure and shock wave impulse at the explosion of hydrocarbons of different composition on the distance from the explosion epicenter is set. The consequences of the BLEVE origin for personnel and buildings are shown. Safe distance in case of the BLEVE occurring in reservoirs with liquefied petroleum gases is calculated.

Key words: liquefied petroleum gases, BLEVE, explosiveness, explosion pressure, wave impulse.

