

## УДК 614.8

*С.І. Зімін, ад'юнкт ад'юнктури, НУЦЗУ,  
К.А. Афанасенко, к.т.н., старший викладач, НУЦЗУ,  
О.М. Семків, д.т.н., професор, проректор, НУЦЗУ,  
В.О. Липовий, к.т.н, доцент кафедри, НУЦЗУ*

### **АНАЛІЗ ПОЖЕЖОВИБУХОНЕБЕЗПЕКИ ФАКЕЛЬНИХ СИСТЕМ ВИРОБНИЧИХ ОБ'ЄКТІВ**

У роботі проведено аналіз пожежної небезпеки факельних систем та їх елементів. Розглянуто статистичні дані щодо аварійних ситуацій та аварій на факельних установках, проаналізовано основні вимоги вітчизняних та зарубіжних нормативних документів щодо протиаварійного захисту факельних систем. Проведено класифікацію факельних систем, здійснено оцінку їх пожежної небезпеки з урахуванням конструкційних особливостей та сформульовано основні напрямки забезпечення їх протипожежного захисту. Проведено розрахунок параметрів вибуху при виникненні аварійної ситуації на факельних системах.

**Ключові слова:** факельна установка, пожежна та аварійна небезпека факельних стволів, конструктивне виконання факельних пристроїв, вибух газоповітряної суміші, параметри вибуху.

**Постановка проблеми.** Промислові підприємства хімічного, нафто-хімічного, енергетичного комплексів, в технологічному процесі яких обертаються горючі гази, легкозайmistі та горючі рідини в своєму складі мають факельні системи, які призначені для бездимного спалювання горючих та токсичних газів або парів в результаті їх періодичного, аварійного або постійного скидання [1].

Основним завданням установки факельних систем на підприємствах – це запобігання потрапляння газу в атмосферу за рахунок його спалювання. Гази і пари, які потрапляють в факельну систему, можуть надходити в неї з технологічних установок від запобіжних клапанів в аварійних ситуаціях. Також на виробництві можливо постійне утворення газів і парів, які за технологією відводяться в факел для спалювання.

При цьому, з урахуванням того, що факельні системи задіяні на підприємствах з різним технологічним процесом та виробничими потужностями, під час їх експлуатації утворюється горюче середовище із вмістом горючих газів та/або парів легкозайmistих та горючих рідин, що може призвести до вибухів різної потужності (в залежності від особливостей факельної системи). Таким чином проблема забезпечення належного рівня пожежовибухобезпеки даних

систем є актуальною.

*Аналіз останніх досягнень та публікацій.* Факельні системи є складним інженерним комплексом і розрізняються за своїми елементами [2, 3]. Класифікація факельних систем здійснюється за наступними показниками:

1) В залежності від характеристик горючих газів і технологічних особливостей виробництва розрізняють факельні системи:

- загальну – систему, яка обслуговує групу технологічно непов'язаних установок (за умови сумісності скидів);

- окрему – систему, яка обслуговує одне виробництво, один цех, одну технологічну установку, один склад або кілька технологічних блоків, які пов'язані в одну технологічну лінію і можуть зупинятися одночасно (одне джерело скидання);

- спеціальну – систему, призначену для спалювання газів або парів, які за своїми властивостями і параметрами не можуть бути спрямовані ні в загальну ні в окрему факельні системи. Ця система використовується також, якщо тиск у технологічній установці не забезпечує скид в загальну факельну систему.

2) Режим роботи: періодичної дії; постійно діючі.

3) Робочій тиск: низького тиску – для обслуговування установок, що працюють під тиском до 0,2 МПа; високого тиску – для обслуговування установок, що працюють під тиском вище 0,2 МПа; локальні аварійні – для обслуговування установок, що працюють під низьким тиском, що виключає прийом газів в газгольдер, а також для спалювання скидних газів, що містять агресивні гази.

4) За молекулярною масою, температурою, тиском і вмістом вологи у скидах:

- суха факельна установка, призначена для роботи з сухими парами вуглеводнів молекулярною масою менше 45 при температурах нижче 0°C.

- мокра факельна установка призначена для роботи з гарячими газами, що містять водяні пари, а також важкі вуглеводні.

5) За місцем скидання газів:

- зі скиданням газів в факельний ствол (вертикальна труба з оголовком і газовим затвором) з постійним відведенням конденсату;

- зі скиданням факельних газів високого тиску на переробку або для спалювання в котельних установках;

- комбіновані системи.

До складу факельної установки обов'язково входить факельна труба (ствол) з пальником, трубопроводи скидних газів, система запалювання і лабіринтовий ущільнювач.

6) За місцем розташування (обумовлено конструкцією факельного ствола):

- окремо розташовані, які розташовуються на відстані десятків або сотень метрів від споруд і технологічних апаратів (висотні);
- розміщені на технологічних установках або поблизу їх (наземні).

Висотні факельні установки можна поділити на: середні (висота 4-25 м); високі (висота > 25м).

Факельні стволи можуть бути як вертикального, так і горизонтального виконання (рис. 1) [4].



Рисунок 1. Факельні стволи горизонтального та вертикального розташування

При використанні відкритих факельних систем можливе застосування наступних типів стволів (рис. 2) [9]: щоглові; самонесучі; з парними стволами; на розтяжках.

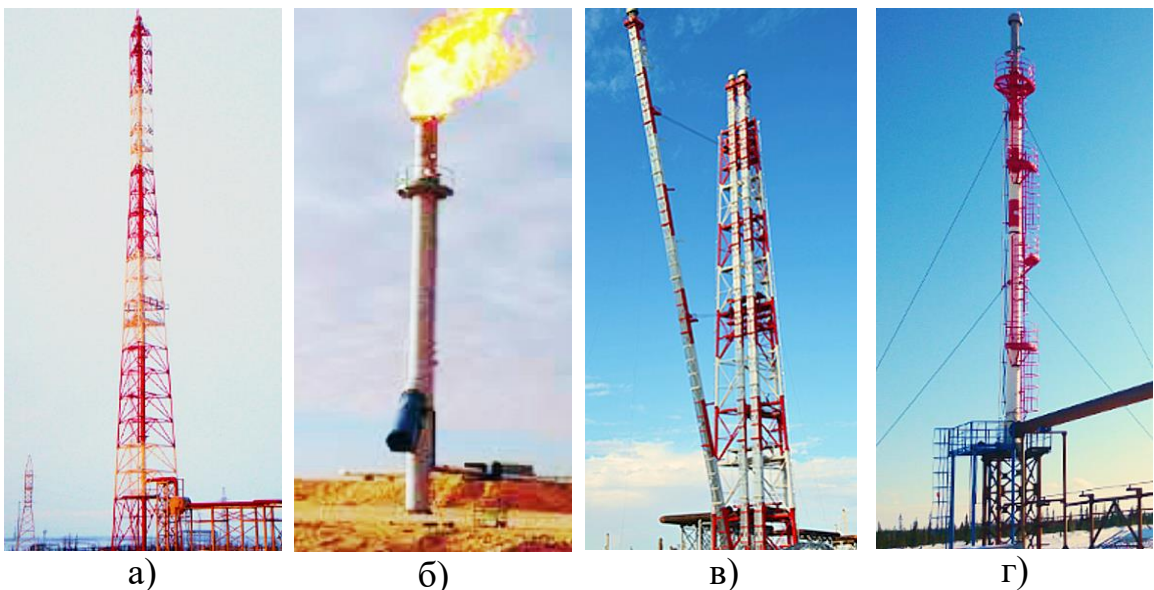
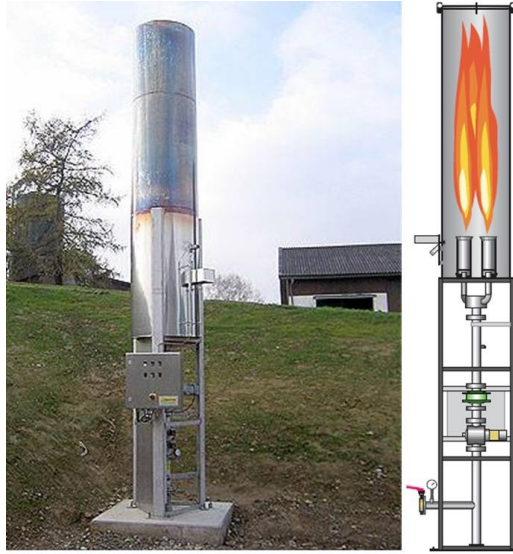


Рисунок 2. Типи факельних стволів: а) щоглові, б) самонесучі, в) з парними стволами, г) на розтяжках

Окрім цього, факельний ствол може бути екранованого типу (рис. 3.) [5].



**Рисунок 3. Автоматизований факельний пристрій для біогазового комплексу**

Найчастіші аварії на факельних установках [6]: внутрішній вибух; винесення рідини; захаращення системи; порушення режиму експлуатації; зрив полум'я.

Так, за статистикою аварійних ситуацій та аварій на факельних установках [6], розподіл їх причин виглядає наступним чином (табл. 1).

**Таблиця 1. Аварійні ситуації і аварії на факельних установках**

№ з/п	Причина аварійної ситуації або аварії	Величина показника, %
1	2	3
1.	Зрив полум'я – Експлуатація	18,6
2.	Зрив полум'я – Невідома причина	15,9
3.	Зрив полум'я – Погода	15,0
4.	Зрив полум'я – Вихід з ладу контрольно-вимірювальної апаратури	6,2
5.	Зрив полум'я – Механічний	5,3
6.	Зрив полум'я – Насичення парою	5,3
7.	Зрив полум'я – Паливо	4,4
8.	Зрив полум'я – Засмічення клапанів	0,9
9.	Вплив сторонніх пожеж	4,5
10.	Засмічення факелу	3,6
11.	Проблеми конструкційних матеріалів	3,6
12.	Пошкодження факелу	2,7
13.	Обернений прохід полум'я – Експлуатація	2,7
14.	Полум'я у шумоглушнику	2,7
15.	Вихід з ладу приборів – Експлуатація	1,8

1	2	3
16.	Внутрішнє горіння – Кокс	1,8
17.	Шум	1,8
18.	Тріщина оголовку факелу – Механічний	0,9
19.	Викиди рідини з факелу	0,9
20.	Дим	0,9

Аналіз табличних даних показує, що номенклатура аварійних ситуацій та аварій на факельних системах достатньо широка, і найбільша кількість аварій пов'язана із можливістю утворення вибухонебезпечної хмари внаслідок зриву полум'я. При цьому, авторами [6] також досліджені аварії не тільки пожежного, а й екологічного характеру.

Однак, при цьому, під час нормальної роботи факельного пристрою існує небезпечне випромінювання від його полум'я, що має вплив на оточуючі об'єкти промислових підприємств.

Вимоги щодо забезпечення протиаварійного та протипожежного захисту факельних пристроїв викладені як у вітчизняних [7], так і зарубіжних [8, 9] нормативних документах. У наведених документах зазначені вимоги щодо улаштування виробничих та технологічних об'єктів та розташування обладнання відносно одне до одного.

Так, у роботі [10] на основі одного з нормативних документів наведені рекомендації щодо мінімальної відстані від ФС до інших об'єктів хімічних та нафтохімічних підприємств, яка складає 50 м.

Однак, при цьому у вказаних документах розташування факельних систем обґрунтовано лише тепловим випромінюванням від факельного стовбуру та не враховує можливість утворення надлишкового тиску вибуху від факельних систем.

**Постановка задачі та її розв'язання.** Таким чином задачею є аналіз параметрів вибуху, що може виникнути під час утворення аварійної ситуації на факельних системах для спалювання біогазу.

В роботі використовувалися вимоги [11] для вибору та обґрунтування розрахункового варіанту.

Кількість речовин, що потрапили до навколишнього простору і можуть утворювати вибухонебезпечні газо-, пароповітряні суміші, визначають за таких умов:

а) відбувається розрахункова аварія одного з апаратів (зрив полум'я з факельного пристрою);

б) відбувається одночасно витікання речовин із трубопроводів, які живлять апарат за прямим і зворотним потоками, протягом проміжку часу, який необхідний для перекривання трубопроводів.

Розрахунковий час перекривання трубопроводів потрібно приймати таким, що дорівнює:

1) часу спрацювання (приведення в дію) системи автоматики

відключення (перекривання) трубопроводів згідно з паспортними даними установки (елементів відключення системи автоматики), якщо імовірність відмови системи автоматики не перевищує  $10^{-6}$  на рік або забезпечується резервування її елементів (але не більше 120 с);

2) 120 с, якщо імовірність відмови системи автоматики перевищує  $10^{-6}$  на рік і не забезпечується резервування її елементів;

3) 300 с у разі ручного відключення (перекривання).

Об'єм горючого газу, що вийшов з трубопроводів,  $m^3$  розраховується за формулою:

$$V_T = V_{1T} + V_{2T}, \quad (1)$$

де  $V_{1T}$  – об'єм ГГ, що вийшов з трубопроводів до їх перекривання,  $m^3$ ;  $V_{2T}$  – об'єм ГГ, що вийшов з трубопроводів після їх перекривання,  $m^3$ .

$$V_{1T} = q \cdot \tau \quad (2)$$

де  $q$  – витрата ГГ, яку визначають згідно з технологічним регламентом залежно від тиску газу в трубопроводі, його діаметра, температури газового середовища тощо,  $m^3/c$ ;  $\tau$  – час перекривання.

$$\begin{aligned} V_{2T} &= \pi \frac{P_2}{P_0} \cdot (r_1^2 L_1 + r_2^2 L_2 + \dots + r_n^2 L_n) = \\ &= 0,01 \cdot \pi \cdot P_2 \cdot (r_1^2 L_1 + r_2^2 L_2 + \dots + r_n^2 L_n) \end{aligned} \quad (3)$$

де  $P_2$  – максимальний тиск газу в трубопроводі за технологічним регламентом, кПа;  $r$  – внутрішній радіус трубопроводів, м;  $L$  – довжина трубопроводів від аварійного апарата до засувки, м;  $P_0$  – атмосферний тиск, що дорівнює 101,3 кПа.

Величину розрахункового надлишкового тиску  $\Delta P$  у кілопаскалях, що розвивається у разі займання газо-, пароповітряних сумішей, визначають за формулою:

$$\Delta P = P_0 \cdot (0,8 \cdot m_{np}^{0,33} / r + 3 \cdot m_{np}^{0,66} / r^2 + 5 \cdot m_{np} / r^3) \quad (4)$$

де  $P_0$  – атмосферний тиск, кПа (101,3 кПа);  $r$  – відстань від геометричного центра зовнішньої установки до межі розрахункової зони, м.

Приведену масу ГГ і/або парів ЛЗР та ГР у кілограмах, обчислюють за формулою:

$$m_{np} = (Q_{зг} / Q_0) \cdot m \cdot Z \quad (5)$$

де  $Q_{зг}$  – питома теплота згоряння ГГ і/або парів ЛЗР та ГР, Дж/кг;  $Z$  – коефіцієнт участі ГГ і/або парів ЛЗР та ГР у горінні, який дозволено приймати 0,1;  $Q_0$  – константа, що дорівнює  $4,52 \cdot 10^6$  Дж/кг;  $m$  – маса ГГ ( $m_r$ ) і/або парів ЛЗР та ГР ( $m_n$ ), які потрапили до навколишнього простору в результаті розрахункової аварії, кг.

Схема факельного стовбуру та розрахункових параметрів вибуху наведена на рис. 4.

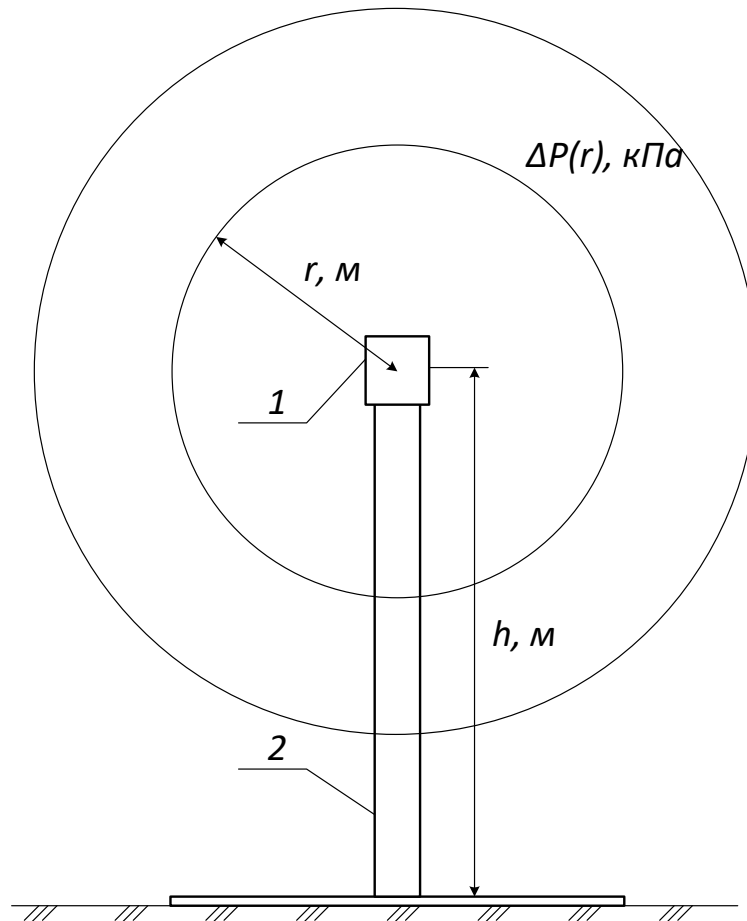


Рисунок 4. Схема факельного стовбуру та розрахункових параметрів вибуху: 1 – факельний оголовок; 2 – факельний стовбур;  $h$  – висота факельного стовбуру, м;  $r$  – радіус надлишкового тиску вибуху;  $\Delta P$  – надлишковий тиск вибуху, кПа

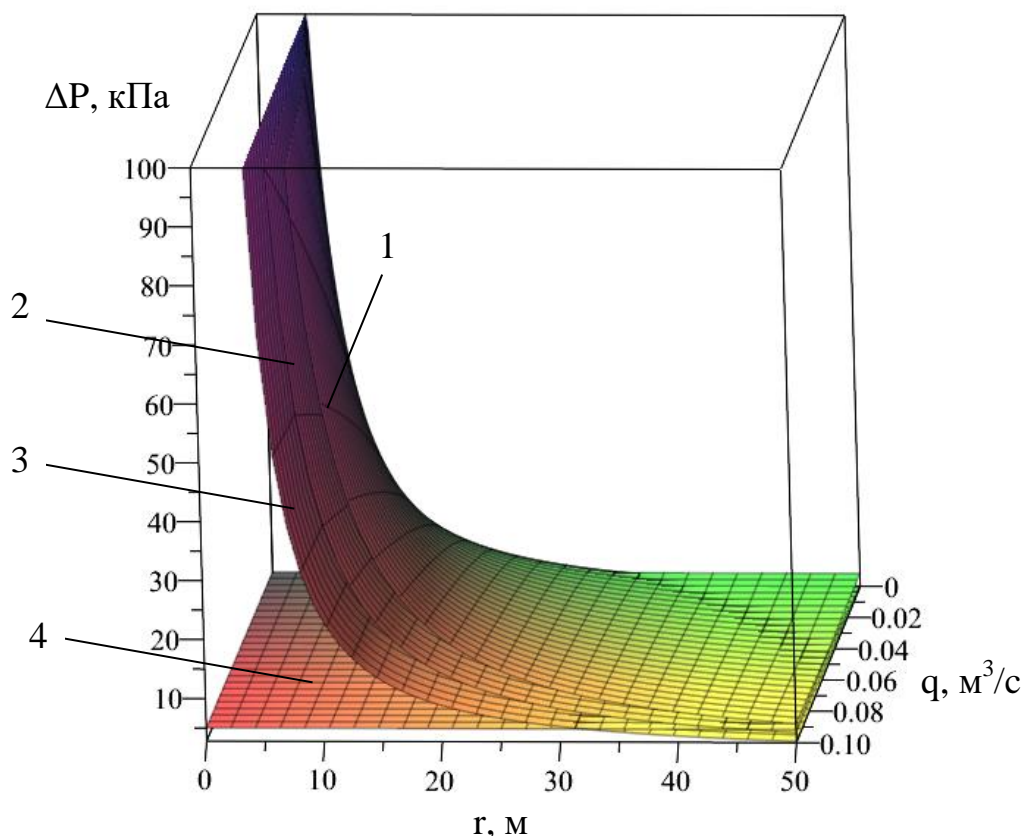
Наслідки впливу величини вибухової хвилі на людей, будівлі та споруди наведені в табл. 2.

**Таблиця 2. Наслідки впливу надлишкового тиску**

Ступінь ураження	Надлишковий тиск, кПа
Повне руйнування будівель	100
50% руйнування будівель	53
Середнє пошкодження будівель	28
Помірні пошкодження будівель (пошкодження внутрішніх перегородок, рам, дверей та ін.)	12
Нижній поріг пошкодження людини хвилею тиску	5
Малі пошкодження (зруйновано частина скління)	3

За вихідні дані для розрахунку вибухової небезпеки при зриві полум'я з факельного пристрою бралися: горючий газ – метан; максимальний тиск газу в технологічному трубопроводі ( $P_2$ ) – 108,3 кПа; щільність газу – 0,7168 кг/м<sup>3</sup>; теплота згоряння газу – 50,1 МДж/кг.

Розрахунки проводилися для трьох випадків перекриття засувок з різним часом:  $\tau_1=10$ ,  $\tau_2=120$  та  $\tau_3=300$  с відповідно.



**Рисунок 5. Величини розрахункового надлишкового тиску вибуху в залежності від відстані від центру вибуху ( $r$ ) та витрати газу ( $q$ ): 1 -  $\Delta P(\tau_3=300$  с), 2 -  $\Delta P(\tau_2=120$  с), 3 -  $\Delta P(\tau_1=10$  с), 4 -  $\Delta P=5$  кПа**



Аналіз розрахункових даних, наведених на рис. 5 показує, що у разі виникнення аварійної ситуації, пов'язаної із зривом полум'я з факельного пристрою можливе утворення горючого середовища із загрозою вибуху, в результаті якого утворюється надлишковий тиск, що призведе до 50% руйнування будівельних конструкцій в радіусі від 7 до 12 м, до середнього пошкодження будівель – від 9 до 17 м, і до негативного впливу на людей в радіусі до 50 м.

Залежність площі, що підпадає під вплив розрахункового надлишкового тиску вибуху можна представити у вигляді:

$$S = \pi \cdot (r^2 - h^2) \quad (6)$$

де  $r$  – радіус, в якому розрахунковий надлишковий тиск вибуху перевищує задане значення, м;  $h$  – висота факельного стовбуру, м.

На рис. 6 для величини розрахункового надлишкового тиску вибуху 28 кПа, що відповідає середньому пошкодженню будівель, наведено залежності горизонтального розміру зони при різних висотах факельного стовбуру.

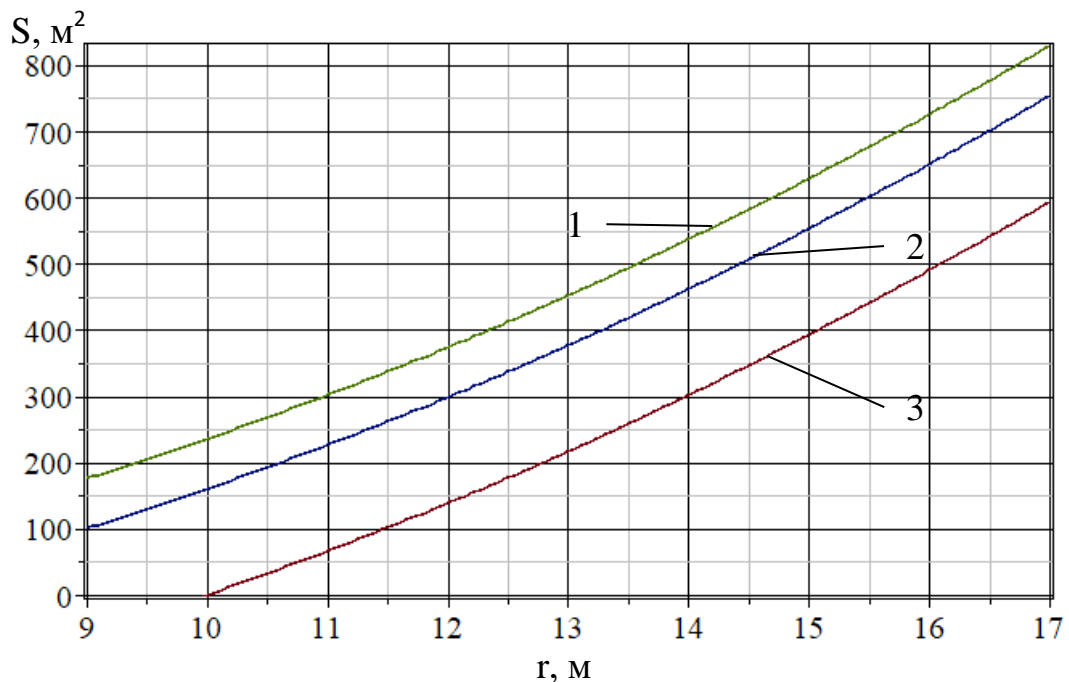


Рисунок 6. Залежність площі, що підпадає під вплив розрахункового надлишкового тиску вибуху, від радіуса при різних висотах факельного стовбуру: 1 –  $h=5$  м; 2 –  $h=7$  м; 3 –  $h=10$  м

Аналіз даних, наведених на рис. 6 показує, що збільшення висоти факельного стовбуру в 2 рази призводить до зменшення площі негативного впливу вибуху на величину до 400%.

**Висновки.** Аналіз конструктивного виконання факельних установок та стволів дозволяє зробити висновок, що їх пожежна небезпека представлена можливістю утворення вибухонебезпечного середовища при виникненні аварійних ситуацій, що обумовлені зривом полум'я з оголовку факелу. В результаті проведеного розрахунку встановлено, що в залежності від конструктивних особливостей факельних систем радіус впливу розрахункового надлишкового тиску вибуху від займання газоповітряних сумішей може змінюватися до 100%, збільшення висоти факельного стовбуру в 2 рази призводить до зменшення площі негативного впливу вибуху на величину до 400%.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Назаров А.А., Поникаров С.И. Факельные установки. Казань: КГТУ, 2010. 118 с.
2. Климентова Г.Ю., Качалова Т.Н., Цивунина И.В. Общезаводское хозяйство химических предприятий: учебное пособие. Казань, 2010. 120 с.
3. Стрижевский И.И., Эльнатанов А.И. Факельные установки. Москва, 1979. 184 с.
4. A. KayodeCoker. Ludwig's Applied Process Design for Chemical And Petrochemical Plants //Gulf Professional Publishing. Volume 1 (4th ed.). 2007. p. 732–737.
5. А.А. Чернявский, В.И. Масликов. Анализ безопасности при эксплуатации биогазовых установок – URL: <http://elibrary.ru/projects/articulus/ArticulusFiles/3791/work/200182/3-233-238.pdf>. (дата звернення: 10.10.2020).
6. Kolmetz, Karl & AL, ling &Yulis, &Riska.Process flare systems safety, selection, sizing, and troubleshooting.Kolmetz Handbook Of Process Equipment Design. (2020). URL: <https://www.klmtechgroup.com/PDF/EDG-SYS/ENGINEERING-DESIGN-GUIDELINES-flare-systems-Rev3.4web.pdf> (дата звернення: 06.10.2020).
7. БН В.1.1-00013741-001:2008. Факельні системи. Промислова безпека. Основні вимоги. Київ, 2008, 43 с.
8. ISO 23251 (Identical). Petroleum and natural gas industries – Pressure-relieving and depressuring systems. Washington, 2008.248 p.
9. Руководство по безопасности факельных систем. Сер. 03. Вып. 68. Москва, 2013. 48 с.
10. Ананьев О.В., Решетов А.В., Филин В.Е. Здания и сооружения факельного хозяйства, экспертиза факельной установки // Журнал «Промышленные и строительные технологии». 2016. Выпуск

№7 (9) URL: <https://maspk.ru/journal/vypusk-7-9-mart-2016/ananyev-reshetov-filin-zdaniya-i-sooruzheniya-fakelnogo-khozyaystva-ekspertiza-fakelnoy-ustanovki/> (дата звернення: 08.10.2020).

11. ДСТУ Б.В.1.1.36:2016.Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. Київ, 2016, 31 с.

12. Запорожець О.І. Безпека життєдіяльності. Підручник. К.: ЦУЛ, 2013. 448 с.

С.И. Зимин, К.А. Афанасенко, О.М. Семкив, В.А. Липовой

**Анализ пожаровзрывоопасности факельных систем промышленных объектов**

В работе проведен анализ пожарной опасности факельных систем и их элементов. Рассмотрены статистические данные аварийных ситуаций и аварий на факельных установках, проанализированы основные требования отечественных и зарубежных нормативных документов по противоаварийной защите факельных систем. Проведена классификация факельных систем, осуществлена оценка их пожарной опасности с учетом конструкционных особенностей и сформулированы основные направления обеспечения их противопожарной защиты. Проведен расчет параметров взрыва при возникновении аварийной ситуации на факельных системах.

**Ключевые слова:** факельная установка, пожарная и аварийная опасность факельных стволов, конструктивное исполнение факельных устройств, взрыв газозоудной смеси, параметры взрыва.

S.I. Zimin, K.A. Afanasenko, O.M. Semkiv, V.O. Lypovyi

**Industrial facilities flare systems fire and explosion hazard analysis**

The analysis of fire hazard of flare systems and their elements is carried out in the work. The statistical data of emergency situations and accidents on flare installations are considered, the basic requirements of domestic and foreign normative documents on emergency protection of flare systems are analyzed. The classification of flare systems is carried out, the assessment of their fire danger is carried out taking into account design features and the basic directions of maintenance of their fire protection are formulated. The calculation of the parameters of the explosion in the event of an emergency on flare systems.

**Keywords:** flare installation, fire and emergency danger of flare trunks, constructive execution of flare devices, explosion of gas-air mixture, explosion parameters.