

С. І. Зімін, н.с. відділу (ORCID 0000-0003-0514-2238)

К. А. Афанасенко, к.т.н., доцент, заст. нач. каф. (ORCID 0000-0003-1877-1551)

В. О. Липовий, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-1967-0720)

Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ТЕМПЕРАТУРНИЙ РЕЖИМ ФАКЕЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ЗАКРИТОГО ТИПУ

Розроблено та виготовлено експериментальний стенд, що моделює факельну установку закритого (екранованого) типу з метою дослідження температурного режиму при її виході на сталий режим роботи. Отримано дані щодо розподілу температур в контрольних точках кожуху експериментального стенду під час його пуску та виходу на сталий режим. Розробка стенду проводилася на основі статистичного аналізу аварій на факельних установках та аналізу пожежної небезпеки факельних установок і факельних пристроїв, як їх частини, для промислових підприємств хімічного, нафто-хімічного, енергетичного комплексів, до яких також відносяться підприємства біогазового комплексу, під час якого встановлено, що дані пристрої можуть представляти небезпеку при їх пуску і роботі в сталому режимі. Визначення температур в точках контролю проводилося за допомогою пірометра GM900 і тепловізору WT3320 HQ. Дослідження проводилися для горіння метану без домішок діоксиду вуглецю при вказаних умовах навколишнього середовища. Отримання значень температур проводилося в 12 контрольних точках по периметру та висоті кожуху установки при витраті газу 11 та 19 л/хв. Встановлено, що установка після пуску виходить на сталий режим роботи в проміжках часу 250–300 с з початку роботи. При цьому спостерігається підвищення температури в контрольних точках кожуху по висоті. За результатами експерименту проведено порівняння середньої температури на зовнішній поверхні кожуха в точках 1–12 при різних витратах. Встановлено, що збільшення витрати газу призводить до підвищення температур в точках 5–12 до 40 %, а в точках 1–4 до зменшення на 20 % при сталому режимі. Отримані експериментальні дані можуть бути використані, як основа для розробки математичної моделі щодо зміни температур на поверхні кожуху факельних систем закритого типу протягом часу.

Ключові слова: факельні системи, факельні пристрої, температура, температурний розподіл, сталий режим роботи

1. Вступ

Підприємства, які відносяться до хімічного, нафто-хімічного, енергетичного комплексів, в технологічному процесі яких обертаються горючі гази, легкозаймисті та горючі рідини найчастіше (в залежності від технологічної схеми) 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, 2].

Основним завданням факельної системи на підприємствах являється запобігання потрапляння газу в атмосферу за рахунок його спалювання [3, 4]. Гази і пари, які потрапляють до факельної системи, 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 на факел для спалювання.

З урахуванням того, що факельні системи використовуються на промислових підприємствах, пов'язаних із обертанням великого об'єму горючих газів та легкозаймистих рідин, то наслідки аварій на даних установках можуть бути достатньо серйозними як за загибеллю та травмуванням людей, так і за матеріальними втратами.

Таким чином, забезпечення пожежної безпеки під час штатної та аварійної роботи факельних систем є актуальною проблемою.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В роботі [5] проведено аналіз найбільш резонансних аварій на факельних системах та їх наслідків (табл. 1). Як видно із наведених в табл. 1 даних, внаслідок пожеж на факельних системах можуть загинути та травмуватися десятки людей, а матеріальні втрати можуть сягнути сотень мільйонів доларів. Недоліком цієї роботи є те, що автори обмежились прикладами лише великих і резонансних аварій.

Табл. 1. Приклади аварій на факельних системах

Небезпека	Місце розташування	Рік	Опис	Наслідки
1	2	3	4	5
Спалювання токсичних потоків	Поза Ріка, Мексика	1951 р.	У факельній трубі виникла несправність, і полум'я згасло більше ніж на 20 хв, внаслідок чого утворився токсичний шлейф	22 людини загинули внаслідок токсичного впливу викиду, 320 людей було госпіталізовано.
Робота на факельних установках	НПЗ Грейнджмут, Великобританія	1987 р.	Виникла пожежа-спалах, за якою пішла пожежа виліву/струменю після раптового викиду вуглеводневих парів і рідин.	2 людини загинули, 2 робітники отримали серйозні опіки. Компанія притягнута до відповідальності та оштрафована на 250000 фунтів стерлінгів.
Переповнення рідиною та застій рідини	Пембрукширський комплекс з переробки та крекінгу, Мілфорд-Хейвен, Уельс	1994 р.	Після удару блискавки проводився повторний пуск установки, і через фактори, у тому числі аварійне затоплення, оперативний персонал не виявив і не запобіг переливу технологічної рідини у факельний барбан.	Викид близько 20 т вуглеводневої рідини та пари. В результаті стався початковий вибух, який призвів до нових пожеж та вибухів. 26 робітників травмовано. Збитки склали 140 мільйонів доларів.
Блокування шляхів аварійного скидання	Нафтохімічний завод, Огаста, США	2001 р.	Утримуваний тиск у відстійнику не визначався через заповнення ліній розплавленим полімером; в результаті чого при знятті кришки відстійника її відірвало надлишковим тиском.	3 робітники загинули внаслідок вибуху та подальшої пожежі.

Факельні системи представляють собою комплекс споруджень підвищеної пожежної безпеки. Їх невід'ємною частиною є факельна установка, на якій безпосередньо проводиться спалювання. В роботах [6, 7] показано, що факельні установки за своїми геометричними характеристиками, конструктивними особливостями, режимами роботи, тощо можуть суттєво відрізнятися одна від одної. Однак, при цьому, в наведених джерелах наводиться інформація лише для факельних систем великої потужності відкритого типу.

Найчастіші аварії на факельних установках [8]: внутрішній вибух; викид рідини; захаращення системи; порушення режиму експлуатації; зрив полум'я.

Так, за статистикою аварійних ситуацій та аварій на факельних установках [8], розподіл їх причин виглядає наступним чином (табл. 2). Недоліком даної роботи є те, що в ній не враховується негативний температурний вплив на навколишнє середовище при сталому режимі роботи установок.

Табл. 2. Аварійні ситуації та аварії на факельних установках

№ з/п	Причина аварійної ситуації або аварії	Значення показника, %
1	2	3
.	Зрив полум'я – Експлуатація	18,6
.	Зрив полум'я – Невідома причина	15,9
.	Зрив полум'я – Погода	15,0
.	Зрив полум'я – Вихід з ладу контрольно-вимірювальної апаратури	6,2
.	Зрив полум'я – Механічний	5,3
.	Зрив полум'я – Насичення парою	5,3
.	Зрив полум'я – Паливо	4,4
.	Зрив полум'я – Засмічення клапанів	0,9
.	Вплив сторонніх пожеж	4,5
0.	Засмічення факелу	3,6
1.	Недоліки конструкційних матеріалів	3,6
2.	Пошкодження факелу	2,7
3.	Обернений прохід полум'я – Експлуатація	2,7
4.	Полум'я у шумоглушнику	2,7
5.	Вихід з ладу приладів – Експлуатація	1,8
6.	Внутрішнє горіння – Кокс	1,8
7.	Шум	1,8
8.	Тріщина оголовку факелу – Механічний	0,9
9.	Викид рідини з факелу	0,9
0.	Дим	0,9

Графічна інтерпретація разом із узагальненням даних табл. 2 наведена на рис. 1. Аналіз статистичних даних, наведених в табл. 2 та на рис. 1 показує, що 71,6 % аварійних ситуацій пов'язані зі зривом полум'я, тобто, можуть привести до утворення вибухонебезпечних паро-газоповітряних сумішей і потенційного вибуху.

Аналіз безпеки утворення вибухонебезпечних сумішей та наслідки цього у разі їх вибуху у відповідності до вимог, встановлених вітчизняними нормативними документами [9], проведений в роботі [10]. Однак, авторами в даній роботі не ставилася задача щодо аналізу безпеки факельних установок під час їх сталої роботи.

При цьому, нормальна робота факельних установок також представляє собою певну небезпеку, у зв'язку із наявністю негативного термічного впливу під час горіння скидних газів, що вказано в [11, 12]. Проведений аналіз нормативних документів та публікацій показав, що оцінка безпеки теплового випромінювання наводиться лише для відкритих факельних установок.

Аналіз наукової періодики показав, що дослідження роботи факельних систем проводилося [13] за допомогою БПЛА. Однак, в роботі використовувалися лише візуальні методи спостереження, без реєстрації температурних параметрів

обладнання, полум'я та димових газів, що унеможливило оцінку негативного температурного впливу роботи факельних систем на оточення.



Рис. 1. Аварійні ситуації на факельних системах, %

В роботі [14] проводилося дослідження інтерпретованих в кольоровому діапазоні сажових залишків при спалюванні газів на факельних установках нафтогазових підприємств. Автори досліджували температурний фон димових газів за допомогою обчислювального комплексу при візуальному спостереженні і проводили аналіз їх безпеки. Однак, в роботі не було поставлено задачі щодо дослідження температури самої факельної системи при її сталій роботі.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми залишається відсутність даних щодо температурних режимів факельних установок закритого типу.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є експериментальне визначення значень температур на поверхні кожуху факельної установки під час виходу її на сталий режим роботи.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- розробити експериментальний стенд, що моделює факельну установку;
- встановити температурний розподіл найбільш нагрітої поверхні розробленого стенду під час його виходу на сталий режим роботи.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є експериментальний стенд, що моделює факельну установку закритого (екранованого) типу. У відповідності до поставлених завдань предметом дослідження є значення температур в контрольних точках поверхні кожуху стенду під час його пуску та виходу в сталий режим роботи.

Гіпотезою дослідження було те, що температурні параметри на поверхні кожуху експериментального стенду є пожежонебезпечними для оточуючого середовища, і вимагають нормування при експлуатації факельних установок закритого типу.

Оскільки експериментальний стенд, як і установка, яку він імітує, є зовніш-

ньою установкою, то дослідження проводились за умов зовнішнього навколишнього середовища.

Вимірювання температури в контрольних точках проводилося за допомогою пірометра моделі GM900 (рис. 2а) та тепловізора моделі WT3320 HQ (рис. 2б).



Рис. 2. Прилади для вимірювання температури а – пірометр GM900; б – тепловізор WT3320 HQ

Вимірювання температур проводилося в 12 контрольних точках, розподілених по колу та висоті кожуху експериментального стенду з періодичністю в 30 с до умовного виходу в сталий режим роботи.

Витрату газу відстежували за допомогою манометру-витратоміру, встановленому на лінії постачання газу.

5. Розробка експериментального стенду, що моделює факельну установку

Дослідження проводились на експериментальному стенді, що моделює факельну установку. Стенд розроблений та виготовлений у масштабі 1:5 відповідно до факельної установки комплексу з виробництва біогазу (рис. 3) і представляє собою факельну установку закритого (екранованого) типу.

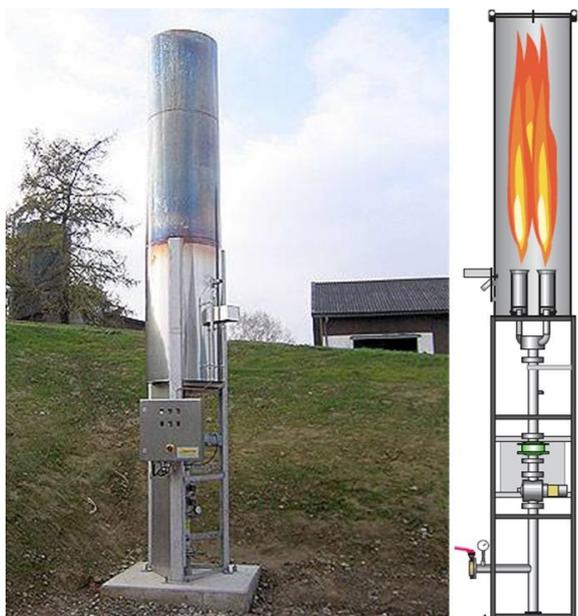


Рис. 3. Автоматизований факельний пристрій закритого (екранованого) типу біогазового комплексу

Аналіз літературних даних [15, 16, 17] показав, що в залежності від вихідної сировини, типу біогазового комплексу та стадії технологічного процесу кількість метану у складі біогазу може суттєво змінюватися (рис. 4). Таким чином, змінюється теплота згоряння і відповідно, температурні параметри газової суміші, що було враховано при розробці та виготовленні установки. Схема експериментальної установки та її зовнішній вигляд наведені на рис. 5.

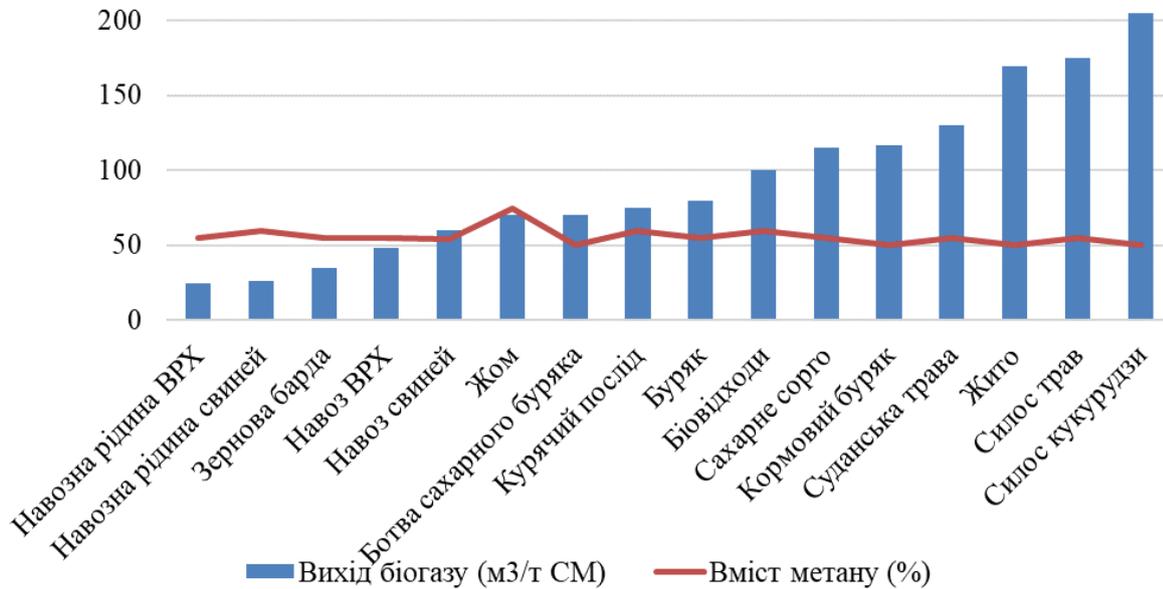


Рис. 4. Орієнтовні показники виходу біогазу і вмісту метану з субстратів рослинного та тваринного походження

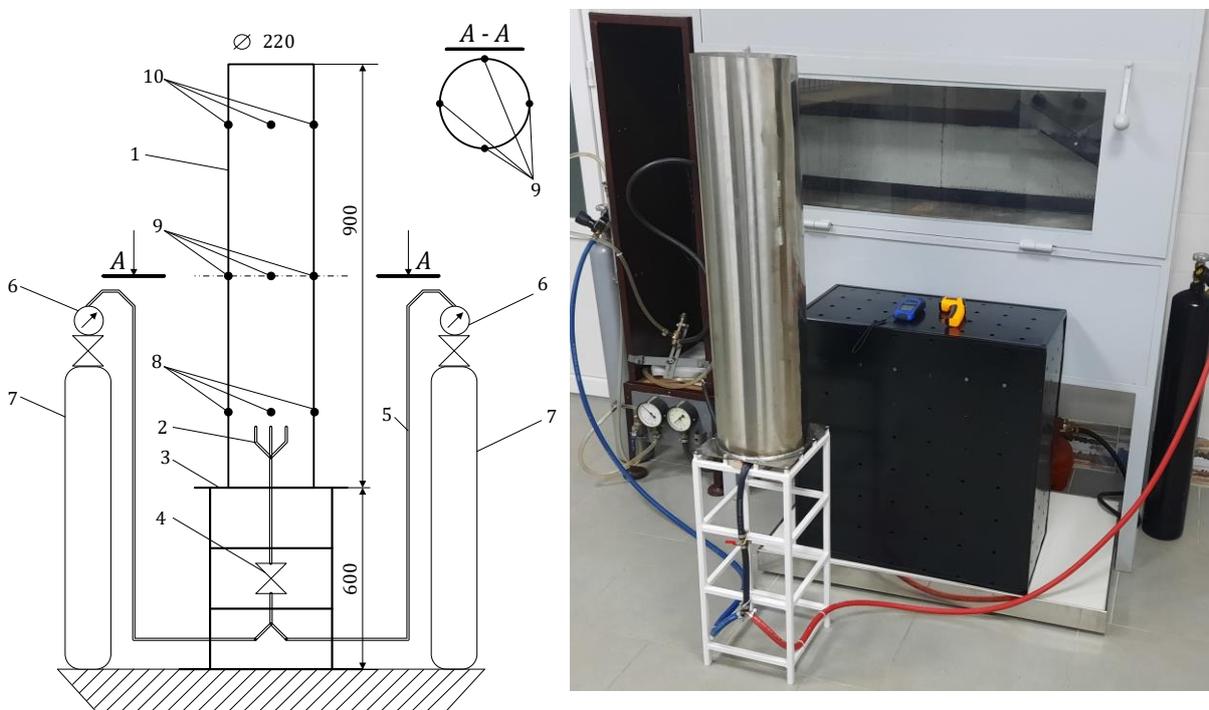


Рис. 5. Схема та зовнішній вигляд експериментальної установки: 1 – кожух факельного стовбуру; 2 – пальник; 3 – станина; 4 – кран; 5 – шланги з'єднувальні; 6 – манометри-витратоміри; 7 – балони (вуглекислий газ та метан); 8 – точки контролю температури (нижній пояс); 9 – точки контролю температури (середній пояс); 10 – точки контролю температури (верхній пояс)

Кожух установки виготовлений із нержавіючої сталі товщиною 3 мм. Для імітації зміни складу біогазу установка має два балони: із метаном та діоксидом вуглецю.

6. Дослідження температурного розподілу на поверхні кожуху розробленого стенду

Визначення температурних параметрів проводилися при температурі, яка коливалась в межах $-5..0$ °C та швидкості вітру $0..5$ м/с.

Термограми факельного горіння метану, які отримані без кожуха наведені на рис. 6.

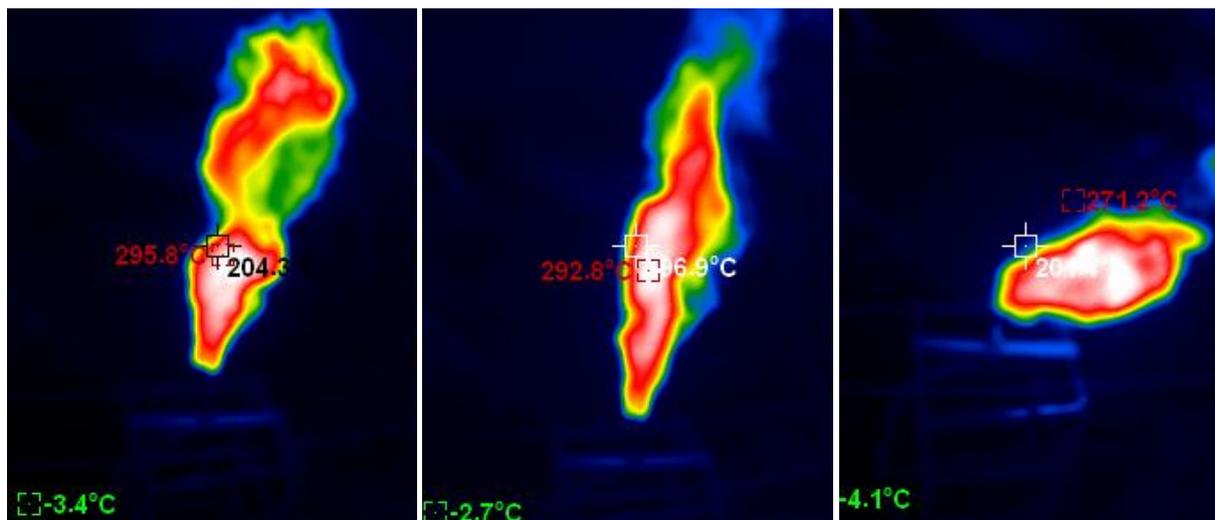


Рис. 6. Термограми факельного горіння метану

Дослідження проводились для горіння метану без домішок діоксиду вуглецю. Експериментальні дані температури контрольних точок при витраті газу 11 л/хв. наведені на рис. 7.

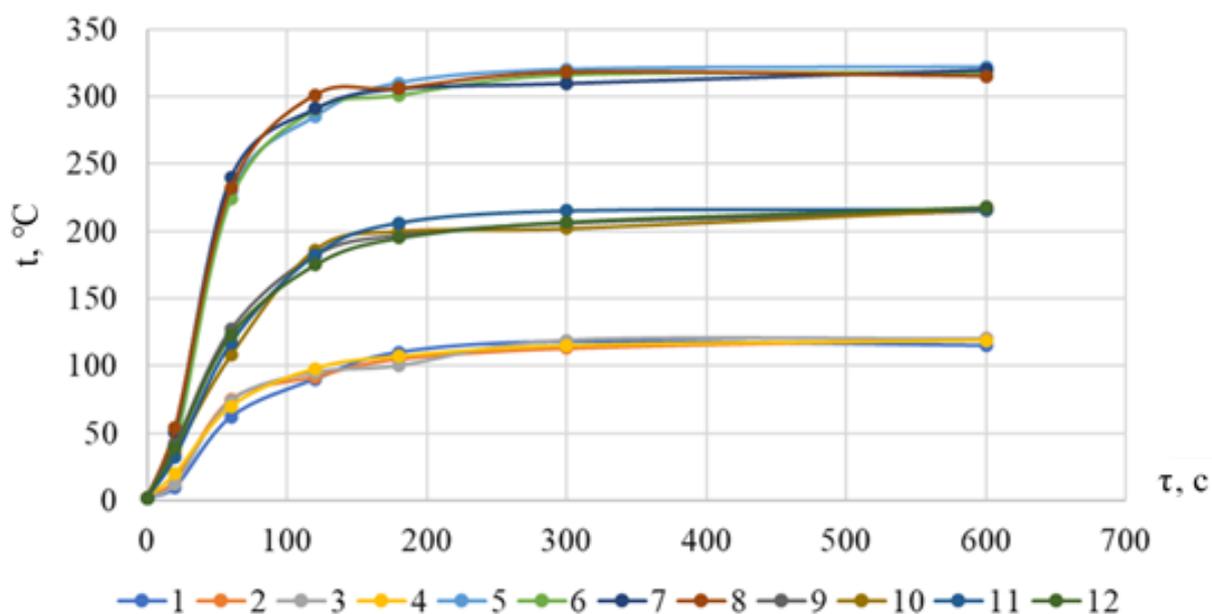


Рис. 7. Залежність температур на зовнішній поверхні кожуху (в точках 1–12, при витраті $q=11$ л/хв.)

Відносна різниця виміру температур на зовнішній поверхні кожуху (в точках 1–12, при витраті $q=11$ л/хв.) наведена на рис. 8.

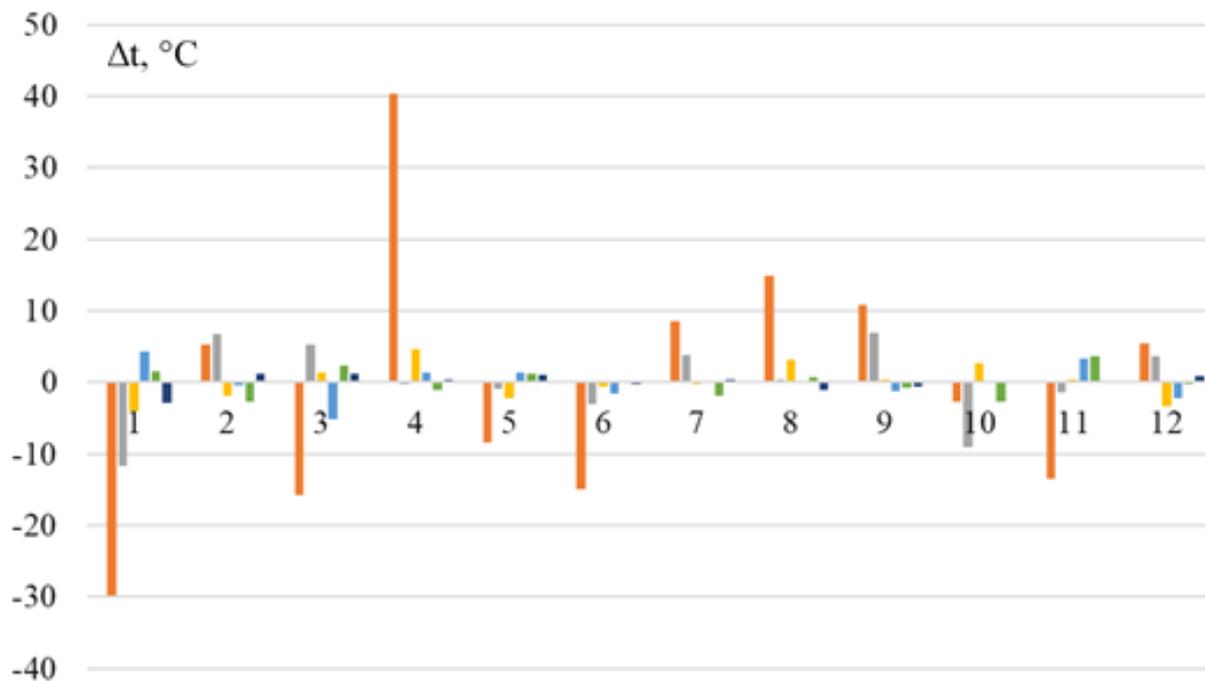


Рис. 8. Відносна різниця виміру температур на зовнішній поверхні кожуху (в точках 1-12, при витраті $q=11$ л/хв.)

Експериментальні дані температури контрольних точок при витраті газу 19 л/хв. наведені на рис. 9.

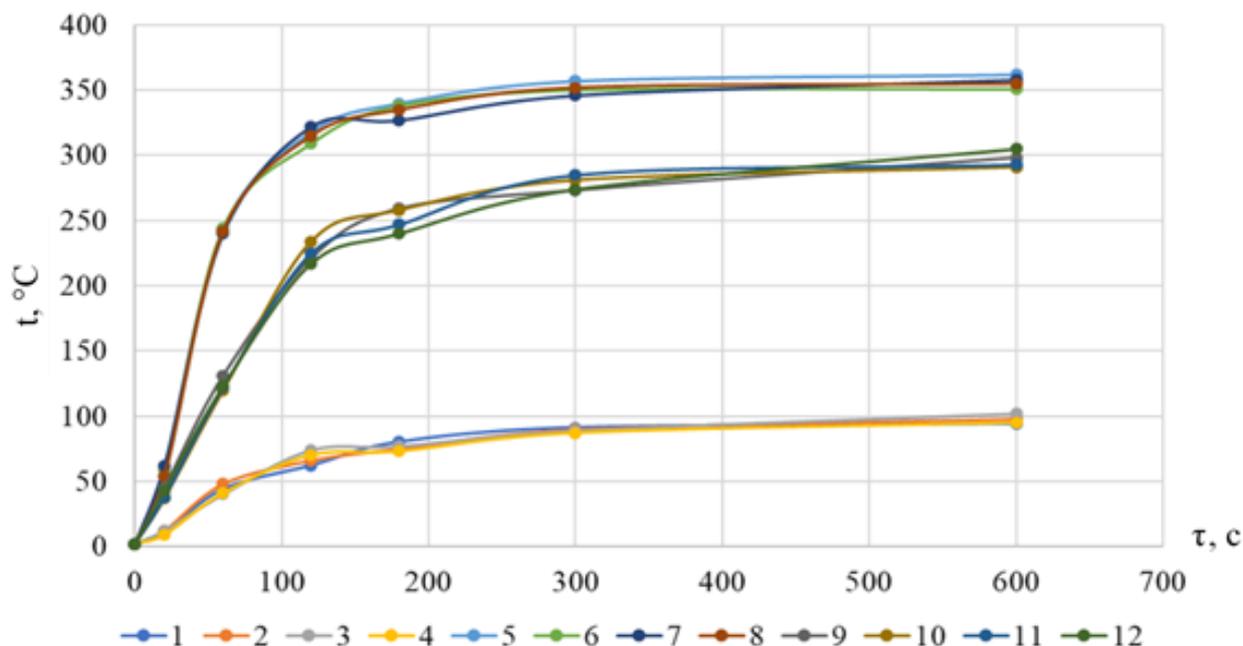


Рис. 9. Залежність температур на зовнішній поверхні кожуха (в точках 1-12, при витраті $q=19$ л/хв.)

Відносна різниця виміру температур на зовнішній поверхні кожуху (в точках 1–12, при витраті $q=19$ л/хв.) наведена на рис. 10.

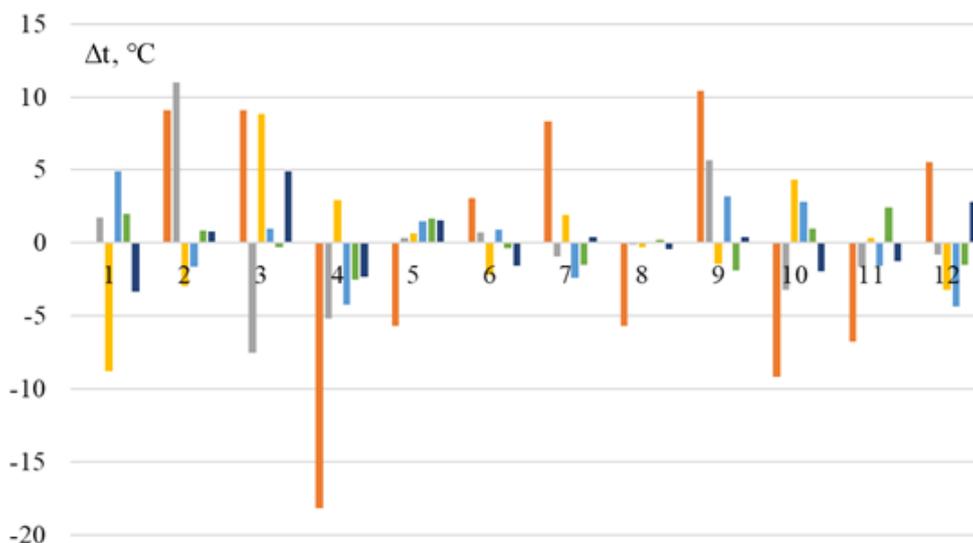


Рис. 10. Відносна різниця виміру температур на зовнішній поверхні кожуху (в точках 1–12, при витраті $q=19$ л/хв.)

Таким чином, при збільшенні витрати газу відносна різниця температур знижується, тобто температурний режим на поверхні кожуху має більш стабільний характер.

7. Обговорення результатів визначення температурних даних (на поверхні кожуху) розробленої установки

Проведено дослідження температурного розподілу по кожуху факельної установки закритого типу при її пуску та виходу на сталий режим роботи. Оскільки авторами при проведенні аналізу літератури не встановлено аналогічних методів досліджень щодо подібних факельних установок, можна вважати, що робота є достатньо унікальною.

Аналіз даних, наведених на рис. 7 показує, що установка виходить на стаціонарний режим роботи в проміжку часу 250–300 с роботи. При цьому спостерігається явне підвищення температури кожуху по висоті. Аналіз даних, наведених на рис. 8 показує, що відносна різниця в температурних показниках найбільша у початковий період пуску установки і становить 6–40 °C, при подальших вимірюваннях (більш пізня стадія) ця величина знижується до 0–12 °C.

Час виходу установки на стаціонарний режим роботи, як і у попередньому випробуванні зберігається в межах 250–300 с. Але в даному випадку температура середнього рівня точок (токи 5–8) підвищується на 30–35 %, а верхнього рівня (точки 9–12) – на 8–10 %.

Проведений аналіз даних (рис. 10), аналогічний до рис. 8 показує, що відносна різниця в температурних показниках найбільша у початковий період пуску установки і становить 0–17 °C, в подальших вимірюваннях ця величина знижується до 0–4 °C. Таким чином, при збільшенні витрати газу відносна різниця температур знижується, тобто температурний режим на поверхні кожуху має більш стабільний характер.

При проведенні досліджень встановлено, що отримання достовірних результатів може бути обмежено декількома факторами. З урахування того, що експериментальний стенд є зовнішньою установкою, це зміна погодних умов (температура, швидкість вітру, вологість повітря тощо). Таким чином, існує необхідність

проведення додаткових досліджень при інших умовах та встановлення кореляції отриманих даних за цих умов.

Розвитком даного дослідження може бути побудова математичної моделі зміни температури в часі по поверхні кожуху факельної установки закритого типу, що пов'язано із складнощами врахування декількох факторів, таких, як погодні умови, склад газу, що спалюється, витрати газу тощо.

8. Висновки

1. Розроблено та виготовлено експериментальний стенд, що представляє масштабовану факельну установку екранованого типу. Стенд розроблений у масштабі 1:5 відповідно до факельної установки комплексу з виробництва біогазу і представляє собою факельну установку закритого (екранованого) типу. Кожух установки виготовлений із нержавіючої сталі товщиною 3 мм. Для імітації зміни складу біогазу установка має два балони із метаном та діоксидом вуглецю із можливістю регулювання подачі суміші газів. Визначення температур в контрольних точках проводилося за допомогою пірометра GM900 і тепловізору WT3320 HQ. Контроль температур здійснювався із періодичністю в 30 с від початку роботи експериментального стенду і до умовного виходу в сталий режим роботи.

2. Отримані експериментальні значення температур на поверхні кожуха установки при горінні метану без домішок діоксиду вуглецю. Експериментальні дані температури отримувались для контрольних точок при витраті газу 11 та 19 л/хв. Значення температур досліджено для 12 точок, рівномірно розподілених по колу та висоті кожуху. Побудовано графіки зміни температур в цих точках. Встановлено, що вихід на стаціонарний режим роботи установки незалежно від витрати газу становить 250–300 с, але у другій серії експериментів (при збільшенні витрати палива до 19 л/хв.) температура середнього рівня точок (точки 5–8) підвищується на 30–35 %, а верхнього рівня (точки 9–12) – на 8–10 %.

Література

1. Smith J. D., Jackson R., Suo-Antilla A. Estimated flare emissions created during flare ignition transient. International Conference on Environmental Impacts of the Oil and Gas Industries: Kurdistan Region of Iraq as a Case Study (EIOGI). 2017. P. 1–2. doi:10.1109/EIOGI.2017.8267637

2. Taghavifar M., Zandi M. A review of new flare gases recovery methods to increase energy efficiency and reduce pollutants. 9th Iranian Conference on Renewable Energy & Distributed Generation (ICREDG). 2022. P. 1–6. doi:10.1109/ICREDG54199.2022.9804550

3. Guo N., Guand K., Qiao J. Flare Soot Monitoring Based on Thermal Infrared Image Processing and Attention-based Meta-learning. 2021 China Automation Congress (CAC). 2021. P. 7098–7103. doi:10.1109/CAC53003.2021.9728333

4. Kayode Coker A. Ludwig's Applied Process Design for Chemical And Petrochemical Plants. Gulf Professional Publishing. Vol. 1(4th ed.). 2007. P. 732–737. <https://www.elsevier.com/books/ludwigs-applied-process-design-for-chemical-and-petrochemical-plants/coker-phd/978-0-7506-7766-0>

5. Paul Denham, Alan Donnelly. Managing the Hazards of Flare Disposal Systems. I Chem E. Symposium Series. № 160. 2015. P. 1–12. <https://www.icheme.org/media/8462/xxv-paper-15.pdf>

6. Petroleum and natural gas industries. Pressure-relieving and depressuring systems. BS EN ISO 23251:2020 (Identical). [Чинний від 2020-11-27] Washington. 2020.

P. 16. https://www.en-standard.eu/bs-en-iso-23251-2020-petroleum-petrochemical-and-natural-gas-industries-pressure-relieving-and-depressuring-systems/?gclid=Cj0KCQiAmaibBhCAARIsAKUlaKRvq0iaK9HwL9feXdqXiYi7hvb0taT003oZrToDUZU2dGK7iacMwRsaAkCPEALw_wcB

7. Khodayee S. M., Chiacchio F. and Papadopoulos Y. A Novel Approach Based on Stochastic Hybrid Fault Tree to Compare Alternative Flare Gas Recovery Systems. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 51029–51049. doi:10.1109/ACCESS.2021.3069807

8. Kolmetz Karl, Ling Yulis Riska. Process flare systems safety, selection, sizing, and troubleshooting. *Kolmetz Handbook Of Process Equipment Design*. KLM Technology Group. 2020. P. 128. https://www.researchgate.net/publication/338831959_PROCESS_FLARE_SYSTEMS_SAFETY_SELECTION_SIZING_AND_TROUBLESHOOTING_Kolmetz_Handbook_Of_Process_Equipment_Design

9. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. [Чинний від 2017-01-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України. 2016. С. 31. http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=65419

10. Kostiantyn Afanasenko, Volodymyr Lypovyi, Serhii Zimin. Manufacturing entities flare systems fire hazard analysis. *Inzynieria Bezpieczenstwa Obiektów Antropogenicznych*. 2021. № 1. P. 9–14. doi:10.37105/iboa.102

11. ВБНВ.1.1-00013741-001:2008. Факельні системи. Промислова безпека. Основні вимоги. [Чинний від 2008-07-03]. Вид. офіц. Київ: Мінпаливенерго України. 2008. С. 44. http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=78441

12. Михайлюк О. П., Афанасенко К. А., Савченко О. В., Зімін С. І., Статівка Є. С. Дослідження щодо безпечного розташування факельних систем біогазової установки. *Проблеми пожежної безпеки: Сборник научных трудов*. 2020. Вып. 47. С. 81–85. <https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/zbirky-naukovykh-prats-ppb/ppb47/12.pdf>

13. M. Al Radi, H. Karki, N. Werghi, S. Javed and J. Dias. Vision-based Inspection of Flare Stacks Operation Using a Visual Servoing Controlled Autonomous Unmanned Aerial Vehicle (UAV). (IECON 2022). 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2022. P. 1–6. doi:10.1109/IECON49645.2022.9968467.

14. K. Gu, Y. Zhang and J. Qiao. Vision-Based Monitoring of Flare Soot. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. Vol. 69. №. 9. 2020. P. 7136–7145. doi:10.1109/TIM.2020.2978921.

15. Mutaqin M.I., Widyarani, Hamidah U., Janetasari S.A., Muchlisand Sintawardarni N. Biogas Consumption Pattern in Indonesia: (A Case Study of Sumedang Community Biogas Plant, Indonesia). 2019 International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA). 2019. P. 113–118. doi:10.1109/ICSEEA47812.2019.8938624

16. Ding W., Wang L., Chen J., Xian Y., Chen B. The review of domestic and international biogas frontiers and technical achievements – A study of the development of biogas technology in Gansu Province. *International Conference on Electrical and Control Engineering*. 2011. P. 3739–3744. doi:10.1109/ICECENG.2011.6058125.

17. Dekhtiar I., Dyvak T., Martsenyuk Y. Features of biogas production process and methods of its modeling. 12th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM). 2013. P. 66–68. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6543193>

S. Zimin, Researcher of the Department
K. Afanasenko, PhD, Associate Professor, Deputy Head of Department
V. Lypovyi, PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

THE TEMPERATURE REGIME OF A CLOSED-TYPE FLARE SYSTEM

An experimental stand simulating a closed-type flare installation was developed and manufactured in order to study the temperature regime when it enters a stable mode of operation. Data on the distribution of temperatures at the points of the casing of the experimental stand during its start-up and transition to a stable mode were obtained. The stand was developed on the basis of a statistical analysis of accidents at flare installations and an analysis of the fire hazard of flare installations and flare devices, as their parts, of industrial enterprises of chemical, petrochemical, energy complexes, which also include enterprises of the biogas complex, during which it was established that these devices may present a hazard during normal operation. Determination of temperatures at control points was carried out using a GM900 pyrometer and a WT3320 HQ thermal imager. Research was conducted for methane combustion without carbon dioxide admixtures. Temperature control was carried out at 12 points along the perimeter and the height of the casing of the installation at a gas consumption of 11 and 19 l/min. It was established that the installation enters a stable mode of operation in time intervals of 250–300 s from the start of operation. At the same time, there is an increase in the temperature of the casing in height. According to the results of the experiment, a comparison of the average temperature on the outer surface of the casing at points 1–12 at different costs was made. It was established that an increase in gas flow leads to an increase in temperatures in points 5–12 by up to 40 %, and in points 1–4 – to a decrease by 20 % in a steady state. The obtained experimental data can be used as a basis for the development of a mathematical model regarding temperature changes on the casing surface of closed flare systems over time.

Keywords: flare systems, flare stacks, temperature, thermal radiation, steady operation mode

References

1. Smith, J.D., Jackson, R., Suo-Antilla, A. (2017). Estimated flare emissions created during flare ignition transient. International Conference on Environmental Impacts of the Oil and Gas Industries: Kurdistan Region of Iraq as a Case Study (EIOGI), 1–2. doi:10.1109/EIOGI.2017.8267637
2. Taghavifar, M., Zandi, M. (2022). A review of new flare gases recovery methods to increase energy efficiency and reduce pollutants. 9th Iranian Conference on Renewable Energy & Distributed Generation (ICREDG). February 23–24, 2022, Mashhad, Iran, 1–6. doi:10.1109/ICREDG54199.2022.9804550
3. Guo, N., Gu, K., Qiao, J. (2021). Flare Soot Monitoring Based on Thermal Infrared Image Processing and Attention-based Meta-learning. China Automation Congress (CAC), 7098–7103. doi:10.1109/CAC53003.2021.9728333
4. Coker, A. Kayode. (2017). Ludwig's Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants. Gulf Professional Publishing (4th ed.), (1), 732–737. <https://www.elsevier.com/books/ludwigs-applied-process-design-for-chemical-and-petrochemical-plants/coker-phd/978-0-7506-7766-0>
5. Denham, Paul, Donnelly, Alan. (2015). Managing the Hazards of Flare Disposal Systems. IChemE. Symposium Series, 160, 1–12. <https://www.icheme.org/media/8462/xxv-paper-15.pdf>
6. Petroleum and natural gas industries. Pressure-relieving and depressuring systems: BS EN ISO 23251:2020 (Identical). (2020). Washington. <https://www.en-standard.eu/bs-en-iso-23251-2020-petroleum-petrochemical-and-natural-gas-industries-pressure-relieving-and-depressuring-systems/?gclid=Cj0KCQiAmaibBhCAARIsAKUlaKRvq0iaK9HwL9feXdqXiYi7hvb0taT003oZrToD>

UZU2dGK7iacMwRsaAkCPEALw_wcB

7. Khodayee, S. M., Chiacchio, F., Papadopoulos, Y. (2021). A Novel Approach Based on Stochastic Hybrid Fault Tree to Compare Alternative Flare Gas Recovery Systems. *IEEE Access*, (9), 51029–51049. doi:10.1109/ACCESS.2021.3069807

8. Kolmetz, Karl, Ling, Yulis, Riska. (2020). Process flare systems safety, selection, sizing, and troubleshooting. *Kolmetz Handbook Of Process Equipment Design*. KLM Technology Group. https://www.researchgate.net/publication/338831959_PROCESS_FLARE_SYSTEMS_SAFETY_SELECTION_SIZING_AND_TROUBLESHOOTING_Kolmetz_Handbook_Of_Process_Equipment_Design

9. Determination of categories of premises, buildings and external installations according to explosion and fire hazard: DSTU B V.1.1–36:2016. (2016). Kyiv: Ministry of the Region of Ukraine. http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=65419

10. Afanasenko, K., Lypovyi, V., Zimin, S. (2021). Manufacturing entities flare systems fire hazard analysis. *Inzynieria Bezpieczenstwa Obiektów Antropogenicznych*, (1), 9–14. doi:10.37105/iboa.102

11. Flare systems. Industrial safety. Basic requirements: VBN V.1.1-00013741-001:2008. (2008). Kyiv: Ministry of Fuel and Energy of Ukraine. http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=78441

12. Mykhailiuk, O. P., Afanasenko, K. A., Savchenko, O. V., Zimin, S. I., Stativka, E. S. (2020). Research on the safe location of flare systems of a biogas plant. *Problems of fire safety: Collection of scientific works*, (47), 81–85. <https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/zbirky-naukovykh-prats-ppb/ppb47/12.pdf>

13. Al Radi, M., Karki, H., Werghi, N., Javed, S. and Dias, J. (2022). Vision-based Inspection of Flare Stacks Operation Using a Visual Servoing Controlled Autonomous Unmanned Aerial Vehicle (UAV). (IECON 2022). 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 1–6. doi:10.1109/IECON49645.2022.9968467.

14. Gu, K., Zhang, Y. and Qiao, J. (2020). Vision-Based Monitoring of Flare Soot. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69, (9), 7136–7145. doi:10.1109/TIM.2020.2978921

15. Mutaqin, M.I., Widyarani, Hamidah, U., Janetasari, S.A., Muchlis, Sintawardarni, N. (2022). Biogas Consumption Pattern in Indonesia: (A Case Study of Sumedang Community Biogas Plant, Indonesia). *International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA)*. October 23–24, 2019, Tangerang, Indonesia, 113–118. doi: 10.1109/ICSEEA47812.2019.8938624

16. Ding, W., Wang, L., Chen, J., Xian, Y., Chen, B. (2011). The review of domestic and international biogas frontiers and technical achievements – A study of the development of biogas technology in Gansu Province. *International Conference on Electrical and Control Engineering*. September 16–18, 2011, Yichang, China, 3739–3744. doi:10.1109/ICECENG.2011.6058125

17. Dekhtiar, I., Dyvak, T., Martsenyuk, Y. (2013). Features of biogas production process and methods of its modeling. *12th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*. February 19–23, 2013, Lviv, Ukraine, 66–68. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6543193>

Надійшла до редколегії: 17.10.2022

Прийнята до друку: 16.11.2022