

## ПРО ВПЛИВ ВОГНЮ НА ТРУБОПРОВОДИ

С.С. Пальчик,

[spalchyk@ukr.net](mailto:spalchyk@ukr.net), ORCID: 0009-0000-0425-4719,

В.Ф. Ісаєв,

[isaevv5@gmail.com](mailto:isaevv5@gmail.com), ORCID: 0000-0002-9947-7284,

В. Кіосак,

[kiosakv@ukr.net](mailto:kiosakv@ukr.net), ORCID: 0000-0002-7433-6709,*Одеська державна академія будівництва та архітектури  
вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, 65029, Україна*

**Анотація:** Аварійне пошкодження трубопроводу може привести до виникнення пожежі. Характер полум'я може бути різний. В даній роботі розглядається випадок виникнення струменевого полум'я. Значення впливу струменевого полум'я зазвичай применшується так як існують досить ефективні методи боротьби з цим явищем і вважається що воно не вимагає негайних дій для упередження неврахованих наслідків. Але, якщо поряд знаходиться паралельна труба чи якісь ємності з легкозаймистим продуктом, то можливе виникнення ефекту доміно, тобто, можливе пошкодження труби, займання продуктів транспортування, обладнання, а також можливі випадки загроз людському життю та приміщенням. У цій роботі представлені результати, отримані в ході експерименту по вивченню впливу звукового струменю газу, що утворює полум'я, на трубу з стоячим газом або з водою. За допомогою датчиків вивчалась температура полум'я, що потрапляло на трубу розташовану на фіксованій відстані. Вивчались зміни температури в залежності від часу нагріву, інтенсивності вогню та місця на трубі. За 19,5с було зареєстровано початкове підвищення температури повітря всередині труби до близько 20°C, яке за 150с піднялось до максимальних 600°C і до 800 °C приблизно за 360 секунд. У другій стадії експерименту, коли труба містила воду, в зоні стінки, що контактувала з рідиною, швидкість нагрівання була значно нижчою, ніж у першій часті експерименту. Максимальна температура досягала приблизно лише 150°C. На основі температур струменевого полум'я та труби було отримано теплові потоки, що досягали труби, та відповідні коефіцієнти теплопередачі. Дослідження довело необхідність вивчення дій струменевого полум'я для забезпечення протипожежного захисту, зокрема завдяки забезпеченню безпечної відстані між трубами. Отримані результати можуть бути застосовані для моделювання можливостей виникнення ефектів ланцюгових пошкоджень в мережах трубопроводів.

**Ключові слова:** струменевий вогонь; вплив полум'я; ефект доміно, тепловий потік; трубопровід.

**Вступ:** Завдяки своїм економічним, екологічним та практичним перевагам, природний газ, в якості ефективного викопного палива, вважається одним з цінніших «потенційних запасів» енергетичної галузі. Підземне транспортування природного газу трубопроводами з впевненістю можна назвати найефективнішим, безпечнішим методом транспортування енергії. Розгалуження газопроводів у світі досягло такої величини, що дослідження безпеки на них стає найактуальнішою задачею, особливо, якщо врахувати вік деяких трубопровідних систем. В Україні експлуатація та будівництво газотранспортних мереж регулюється державними будівельними нормами ДБН В.2.5-20 — «Газопостачання» [1]. Наявна інформація про реальні аварії на трубопроводах свідчить, що серед катастроф

найпоширенішими є пожежі за участі резервуарів, що становлять приблизно 65% випадків, 30% складають спалахи вогню і 4,5% - струменеві пожежі. Ці цифри варіюються в різних дослідженнях, але в них всіх співпадає співвідношення числа інших пожеж до струменевих і складає різницю більше ніж в 10 разів. Незважаючи на обмежену кількість відкритих даних щодо аварій, спричинених струменевим вогнем, аналіз наявних випадків свідчить про їх надзвичайно тяжкі наслідки для паралельно прокладених або близько розташованих трубопроводів. Витік горючого газу або двофазного потоку через локальні пошкодження труби з подальшим займанням може призводити до ураження сусіднього трубопроводу та створення умов для розвитку аварій типу «доміно». Вплив малих та середніх струменів вогню на стан трубопроводу за відсутності або пошкодження вогнезахисного покриття, інтенсивність виникаючих теплових навантажень залишається недостатньо врахованими. У зв'язку з цим постає проблема обґрунтування безпечних відстаней між трубопроводами та необхідності комплексної оцінки ризиків при їх спільному прокладанні.

**Актуальність дослідження:** Експлуатація паралельних підземних трубопроводів супроводжується підвищеним рівнем ризику, оскільки аварійний розрив газопроводу або трубопроводу для транспортування скраплених продуктів може призвести до пошкодження сусідніх ліній. У разі утворення кратера та займання витоків сусідній трубопровід, що знаходиться в його межах, зазнає одночасного впливу тиску газу в ґрунті та інтенсивного теплового навантаження, що створює умови для реалізації ефекту доміно та поширення аварійних наслідків.

Незважаючи на практичну значущість проблеми, підходи до ідентифікації та кількісної оцінки сценаріїв аварій типу «доміно» залишаються неоднозначними, а наявні моделі прогнозування розмірів кратера потребують перевірки їх адекватності для обґрунтування безпечних відстаней між трубопроводами. У зв'язку з цим актуальним є дослідження можливості виникнення ефекту доміно для паралельних трубопроводів на основі експериментів з використанням установок, які близько модулюють наявну ситуацію та дозволяють підвищити рівень безпеки їх проектування та експлуатації.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Не дивлячись на слабку поширеність інформації про струменеві пожежі, виявлення, вплив та наслідки витоків з невеликих отворів чи тріщин є предметом дослідження великої групи вчених і мають відображення в науковій літературі.

Дослідження технологій виявлення витоків з газопроводів розпочалося в 1970-х роках, і методи виявлення можна умовно розділити на два типи: програмні та апаратні [2,3]. Програмні методи виявлення базуються на інтелектуальних алгоритмах, що використовують програмне забезпечення для аналізу даних, щоб зробити висновок про наявність витоків на основі аномалій у внутрішніх параметрів трубопроводу (таких як тиск, температура та швидкість потоку) [4]. Ці методи, як правило, є недорогими та простими у впровадженні, але мають обмеження щодо швидкості реакції системи, точності визначення місця витоків та мінімального розміру витоків, який можна виявити [5, 6]. Існуючі програмні методи виявлення включають методи балансу маси та об'єму та методи виявлення за допомогою моделей у реальному часі. Апаратні методи передбачають розміщення датчиків безпосередньо на трубопроводі, але таке виявлення пошкоджень вимагає більших витрат на обладнання та встановлення, хоча порівняно з програмними методами вони забезпечують більш надійний, швидкий моніторинг та вищу точність визначення місця розташування.

В роботах автори [7-12] оцінювали вплив високого тиску на концентрацію витоків в точці вимірювання в трубопроводах, що проходять паралельно. Зокрема, в статті [7]

вивчались безпечні відстані підземного газопроводу, аналізуючи можливі наслідки аварії, пов'язаної з високим тиском рідини, що витікає з труби. Робота [8] присвячена дослідженню наслідків викидів горючого газу під високим тиском з різних розмірів розривів у двох паралельних газопроводах. Інші автори [9, 10] зосередили свою увагу на аналізі матеріалів трубопроводів, на яких виникли несправності при конкретних аваріях, які були викликані дією струменя високого тиску, що випускається з вихідної труби та пошкоджує іншу. В дослідженні [11] проаналізовано можливе поширення аварійних наслідків в разі розгерметизації трубопроводу, пов'язаної з тепловим випромінюванням, вибухом або викидом фрагментів. В тому числі була розроблена модель [12], що дозволяє оцінити, як ефект доміно може вплинути на частоту відмов системи трубопроводів.

**Мета дослідження** дослідити вплив струменевого вогню та наслідків розриву газопроводу на безпеку паралельних підземних трубопроводів з метою оцінювання ймовірності виникнення ефекту доміно.

**Задачі дослідження:**

- проаналізувати сценарії аварій паралельних підземних трубопроводів із урахуванням ефекту доміно;
- оцінити вплив тиску витіку та теплового навантаження струменевого вогню на сусідні трубопроводи;
- дослідити можливість поширення пошкоджень залежно від взаємного розташування трубопроводів у кратері.

Ефект доміно, спричинений зіткненням струменевого вогню з трубопроводами. Деякі трубопроводи експлуатуються вже кілька десятиліть, стикаючись з такими загрозами для безпеки, як корозія, витончення та зниження міцності, а також такими факторами, як пошкодження навколишнього середовища та втручання людини. Витік з газопроводу, якщо випущена речовина є легкозаймистою, може призвести до серйозних катастроф, таких як пожежі та вибухи [9, 10]. Згідно зі звітом Європейської групи з даних про інциденти на газопроводах (EGIG), витік з трубопроводу поділяється на три розміри: точковий отвір, отвір та розрив. Точкові отвори – це отвори витіку з ефективним діаметром менше 20 мм, які є найпоширенішим типом витіку в газопроводах [13]. Точкові отвори дуже малі та їх важко виявити, що становить значну потенційну небезпеку (Рис.1).

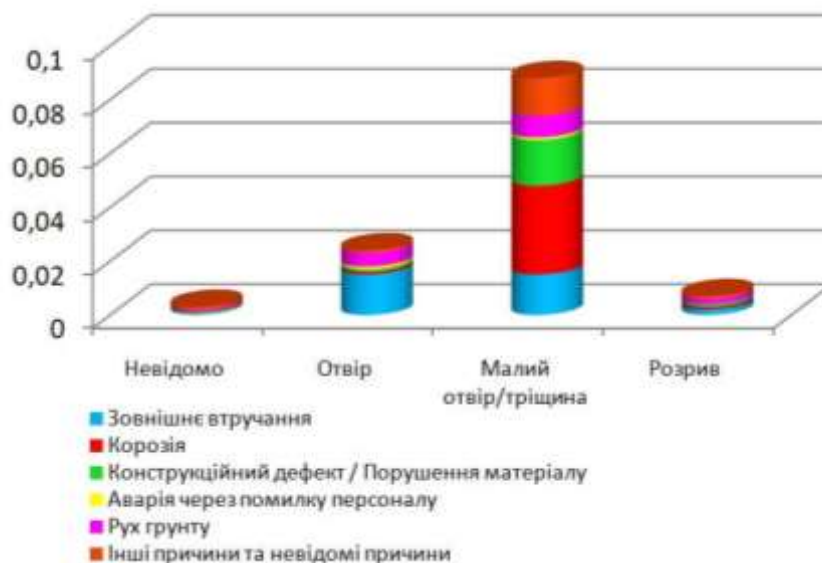


Рис.1. Первинна частота пошкоджень, причина та розмір витіку ([13])

Часто з практичних та економічних міркувань у одній траншеї встановлюють кілька паралельних труб. У цьому випадку, якщо в одній з них виникає струменевий вогонь, ймовірність його поширення на іншу буде залежати від напрямку та довжини струменя, діаметра обох трубопроводів та відстані між ними. У випадку підземних трубопроводів це також може статися, коли кратер утворюється внаслідок вибуху або витoku під тиском; якщо як первинна, так і цільова труби знаходяться всередині кратера, може статися вплив струменевої пожежі. Якщо цільова труба транспортує газ і не має теплоізоляції або ізоляція пошкоджена, температура стінки труби може швидко досягти високого і небезпечного значення. Якщо вона транспортує рідину, її охолоджувальний потенціал захистить трубу; однак, якщо дія блокувальних клапанів зупинить потік, ризик значно збільшиться. Інформація про інциденти з аваріями, які викликані струменевими пожежами, що мають ускладнені наслідки, трапляється в прямому доступі, але дуже скупа. В табл. 1 наведено типові приклади таких аварій.

Таблиця 1

Випадки каскадного поширення аварійних процесів в паралельних трубопроводах.

№№	Місцезнаходження, рік	Труба-джерело матеріал/діаметр	Цільова труба №1 матеріал/діаметр	Цільова труба №2 матеріал/діаметр	Послідовність аварії	Причина
1.	Чарльстон США, 1971	Етанол/Недоступно	Ацетилен / Недоступно	-	Пожежа, вибух	Зовнішня подія
В результаті зіткнення залізничного вагону з трубопроводом етанолу потік вогню етанолу потрапив на трубопровід ацетилену, який пізніше вибухнув						
2.	Венесуела, 1984	Нафта/8 дюймів	ПГ/16 дюймів	-	Пожежа, пожежа, відмова	Відмова зварювання
Нафтопровід вийшов з ладу; потік вогню привів до розриву 16-дюймової газової труби, утворивши отвір у 1,5 дюйм; інший потік вогню призвів до подальших розривів труби						
3.	1990, США	Вода/6 дюймів	ПГ/4 дюйма	-	Пошкодження, вибух, пожежа	Корозія
Витік води з периферійної тріщини в 6-дюймовому трубопроводі розмив ґрунтову основу під 4-дюймовим чавунним газопроводом, який згодом тріснув, вивільняючи природний газ, який зрештою вибухнув і призвів до пожежі. Зруйновано два будинки. Одна людина загинула, ще дев'ятеро отримали поранення.						
4.	Канада, 1995	ПГ/42 дюйми	ПГ/36 дюймів	ПГ/48 дюймів	Пожежа, пожежа, відмова	Напруження корозія тріщина
Корозія розірвала 42-дюймовий газопровід. Потік полум'я вплинув на 36-дюймовий газопровід: розрив; пожежа на третій 48-дюймовій газовій трубі, яка не вийшла з ладу						
5.	Пакістан 2003	ПГ/30 дюймів	ПГ/24 дюйма	-	Вибух, пошкодження	Диверсія
Вибух (диверсія) спричинив розрив 30-дюймової повітряної газової труби, яка була розташована над зрошувальним каналом. В неї був створений отвір (4 x 10 дюймів). Струмінь газу спричинив піскоструминну обробку 24-дюймової підземної газової труби. Через 80 хв. 24-дюймова труба розірвалася.						

6.	Пакистан, 2004	ПГ/24 дюйми	ПГ/18 дюймів	ПГ/30 дюймів	Вибух, пожежа, відмова	Диверсія
Вибух (диверсія) розірвав 24-дюймовий газопровід. Потік полум'я вплинув на 18-дюймовий газопровід, який вийшов з ладу. Теплове випромінювання пошкодило покриття 30 дюймової труби						
7.	США, 2011	ПГ/30 дюймів	ПГ/30 дюймів	-	Вибух, пожежа пошкодження	Зовнішня корозія
Газопровід вибухнув, струменева пожежа горіла протягом декількох годин і пошкодила сусідній трубопровід						
8.	Канада, 2012	Сірчистий газ/16 дюймів	Сірчисти й газ/ 6,62 дюйма	-	Вибух, пожежа, пожежа, відмова	Зовнішня корозія
У заглибленого трубопроводу у 16 дюймів стався розрив; кратер, струменева пожежа; за 25 хвилин сталося розрив та займання 6,62-дюймової труби в тієї ж траншеї						

Пожежі струменів часто менші за пожежі резервуарів транспортування. В багатьох випадках вони не призводять до серйозних наслідків, оскільки їх тепловий радіаційний потік відносно невеликий і швидко зменшується з відстанню; крім того, в деяких випадках їх можна швидко зупинити, просто заклавши клапан. Отже, ймовірно, частота виникнення пожеж цього типу є насправді вищою, ніж можна було б зробити висновок на основі даних, зареєстрованих у базах даних про аварії, оскільки багато невеликих струменевих пожеж без значних наслідків не включені до них. Це, ймовірно, також є причиною того, що певні заходи безпеки, наприклад, практики протипожежного захисту обладнання, враховують лише наслідки пожеж великих площ, а не пожеж струменів. Однак, якщо полум'я потрапляє на обладнання, теплові потоки можуть бути дуже високими через одночасний вплив як радіаційного, так і, що ще важливіше, конвективного теплообміну. Це, разом з можливим ерозійним ефектом струменя високої швидкості, може за короткий час спричинити руйнування резервуара або труби, що призведе до вторинної ланцюгової аварії, яка може бути причиною ще однієї пожежі, вибуху або витоку токсичних речовин. Розмір і геометрія струменевої пожежі варіюються в залежності від витрати палива і напрямку струменя (вертикальний, горизонтальний або похилий).

Струменеві пожежі можуть виникати при безперервному витоку горючих газів (через отвір, пошкодження в трубі, запобіжний клапан), які займаються; джерелом займання може бути інша пожежа, удар, електростатична іскра тощо. Якщо відбувається витік двофазної рідини під тиском зрідженого газу, можливості дещо складніші, але знову ж таки, струменевий вогонь виникне, якщо буде запалення.

У разі витоку газу або двофазного витоку (другий випадок виникає внаслідок миттєвого випаровування рідини) слід враховувати, що в більшості випадків струмінь матиме високий імпульс із швидкістю звуку на виході (для більшості газів швидкість звуку досягається, коли тиск усередині резервуара або труби дорівнює або перевищує приблизно 2 бари абсолютного тиску). Це важливий факт, оскільки він передбачає більшу турбулентність, більш значне захоплення повітря та краще згорання палива з вищими тепловими потоками у разі впливу полум'я.

**Виклад основного матеріалу.** Експериментальна установка. Усвідомлення важливості експериментальних випробувань призвело до створення різноманітних експериментальних установок, які використовувались як інструмент для аналізу поведінки труби, що транспортує або містить певну рідину, або захищена певним вогнезахисним шаром, під дією

струменевого вогню [14]. До таких установок відноситься установка для вивчення дії струменевого вогню за різних умов на трубу (рис. 2).

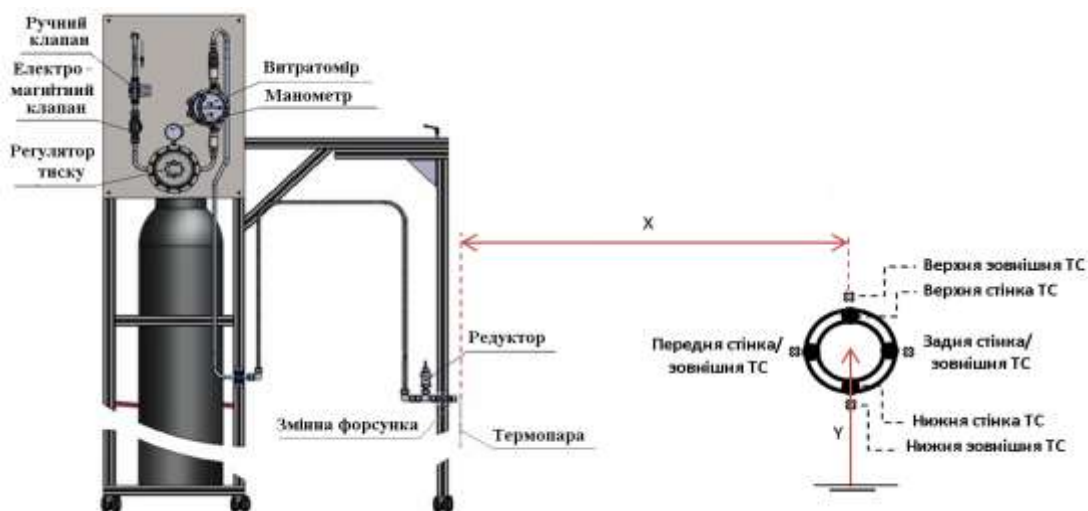


Рис.2. Схема експериментальної установки

Вона може створювати горизонтальні струменеві пожежі довжиною до 3 м, використовуючи різні тиски газу та діаметри вихідних отворів. Струмені вогню впливали на трубу з вуглецевої сталі, зовнішній діаметр якої 0,11 м, товщина стінки 0,8 см. Труба містила стоячий газ або воду. Як джерело газу використовували промисловий балон з пропаном.

Були виміряні швидкість потоку, тиск і температура пропану, що подавався до струменевого вогню. Тиск пропану вимірювався в точці, розташованій на 12 см вище від точки випуску; температура струменя в точці випуску також вимірювалася за допомогою термопар типу К. Набір термопар типу К, розташованих всередині стінки труби, дозволив виміряти температуру стінки під час випробувань.

Пожежа струменя була знята як на видиму (рис.3), так і на інфрачервону термографічну камеру (рис.4), розташовану перпендикулярно до полум'я. Два датчики теплового потоку (типу Gardon gauge) були розташовані на різній відстані від полум'я.



Рис.3. Видиме зображення пропанового струменевого вогню, що впливає на трубу ( $d = 0,5$  см;  $D_{тр} = 0,11$  м).

Значення тиску, температури та теплового потоку випромінювання постійно реєструвалися під час випробувань за допомогою системи збору даних (Fieldpoint) з вищезазначених вимірювальних приладів.

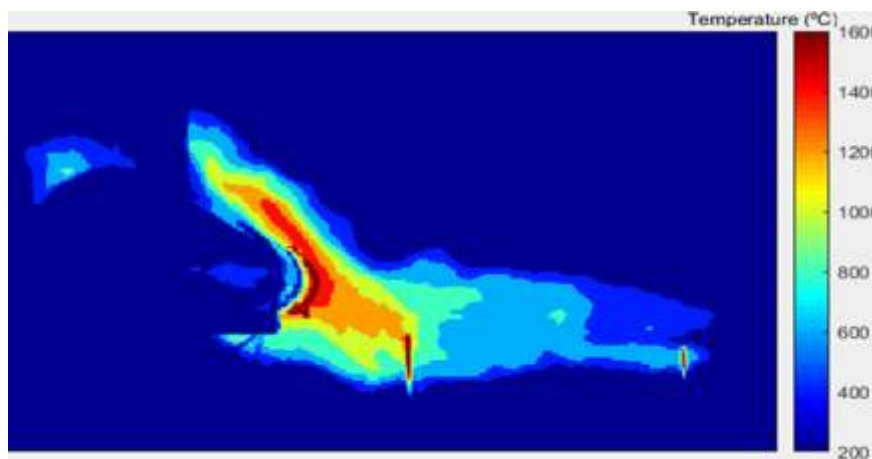


Рис. 4. Інфрачервоне зображення пропанового струменевого вогню, що впливає на трубу ( $d = 0,5$  см;  $D_{тр} = 0,11$  м).

Вплив полум'я на трубу. У всіх випробуваннях, крім одного, полум'я утворювалося від звукового струменя газу, оскільки це найпоширеніша ситуація (задушене потоком) у випадку витоку (з пропаном швидкість у отворі досягає звукової, якщо  $P_{тр}/P_{атм} > 1,75$ ); діаметр отвору становив  $d = 0,5$  см. Не дивлячись на вплив значних коливань через високу турбулентність, довжину видимого полум'я (з поправкою на кривизну) можна було передбачити з відносно високою точністю (якщо не було зіткнення) за допомогою виразу  $L_{плам} = d \cdot Re^{0,4}$  ([15]). Однак, існування перешкоди — труби, обладнання — має певний вплив як на форму полум'я, так і на його турбулентність. Типовий струмінь можна побачити на рисунку 3 разом з відповідним зображенням області, що постраждала від зіткнення, «нагрітої до червоного» цільової труби. Через дуже високу швидкість потоку та обмежене змішування палива і повітря одразу після витоку, горіння може відбуватися лише далі за течією, де точка відриву позначена синім кільцевим полум'ям горіння, приблизно на відстані 0,25 м від отвору. Від цієї точки довжина видимого полум'я становила приблизно 1,2 м. Форма полум'я була дещо порушена наявністю цільової труби.

Газ усередині труби, звуковий струмінь. На першому етапі експерименту швидкість нагрівання стінки труби була дуже високою через велику різницю температур між нею та полум'ям. На рисунку 5 показано зміну температури, зареєстровану чотирма термопарами (типу К), розташованими (всередині стінки) відповідно зверху, знизу, спереду та ззаду по периметру труби (зі стоячим газом всередині), на яку потрапляє полум'я центральної частини звукового струменя газу. Крім того, чотири термопари типу В були розташовані зовні труби, перед термопарами в стінці труби, на відстані 1 см від стінки (рисунком 2) для вимірювання температури полум'я. Вогнезахисту в цьому експерименті не було передбачено.

Температура труби, що піддається впливу струменевого вогню, швидко підвищується, коли вона транспортує або містить газ. Наприклад, між початковою температурою труби  $25^{\circ}\text{C}$  та  $100^{\circ}\text{C}$  були зареєстровані такі швидкості нагрівання:  $19,5^{\circ}\text{C}/\text{с}$  для передньої ТС-1,  $5,5^{\circ}\text{C}/\text{с}$  для нижньої ТС-4,  $3,7^{\circ}\text{C}/\text{с}$  для верхньої ТС-2 та  $2,2^{\circ}\text{C}/\text{с}$  для задньої ТС-3.

Передня поверхня, ТС-1, зазнала найсильнішого нагрівання через більшу турбулентність і більш інтенсивний конвективний вплив. Швидкість нагрівання потім поступово зменшувалася, досягнувши температури  $600^{\circ}\text{C}$  через 2,5 хвилини після початку струменевого горіння (це відповідає приблизно 50% коефіцієнту міцності вуглецевої сталі при кімнатній температурі) і  $750^{\circ}\text{C}$  (приблизний коефіцієнт міцності сталі: 15 %) через 5,4 хвилини. Тривалість випробування: 9,7 хвилин.

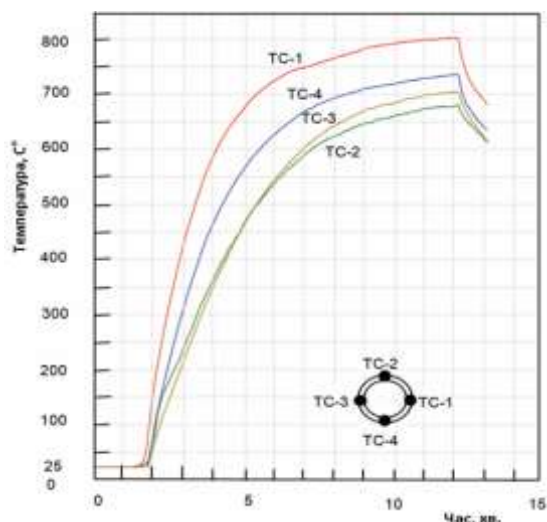


Рис.5. Залежність температури стінок труби від часу (стоячий газ всередині труби, звуковий струмінь)

Термопара, розташована в нижній стінці (ТС-4) труби, реєструвала нижчі, хоча і дуже високі, температури, досягаючи максимальної температури 737°C. Деяко нижчі температури були зареєстровані термопарами верхньої та задньої стінок (ТС-2, ТС-3), навіть якщо стінка труби контактувала з полум'ям; це можна, ймовірно, пояснити меншим конвективним впливом на задню поверхню труби, спричиненим негативним впливом струменя полум'я. Отримані значення температури і швидкість, з якими вони досягають максимальних значень, вказує на високу ймовірність руйнування труби, що піддається внутрішньому тиску і можливість більш тяжких наслідків за дуже короткий час.

Рідина всередині труби, звуковий струмінь. Якщо труба містить або транспортує рідину, поверхня стінки, що контактує з нею (тобто ділянка стінки під рівнем рідини), буде охолоджуватися рідиною, яка через короткий час почне кипіти, а її температура досягне значно нижчих значень. На рисунку 6 показано зміну температури в різних точках труби, на яку впливає струменевий вогонь (з тими самими характеристиками, що й на рисунку 5); у цьому випадку в трубі містилася стояча вода.

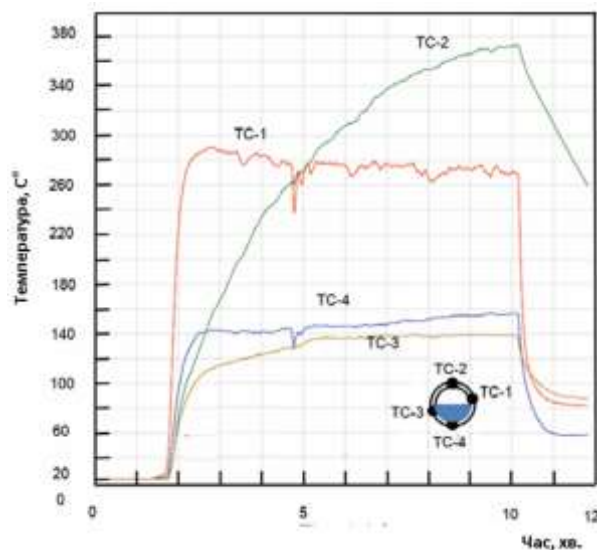


Рис. 6 Залежність температури стінок труби від часу (стояча вода всередині труби, звуковий струмінь)

Температури, зареєстровані термопарами, розташованими у передній та верхній зонах, були відносно високими, але значно нижчими, ніж ті, що були виявлені, коли труба містила повітря, а температури, виміряні термопарами, розташованими в зонах стінки, що контактують з водою, мали значно нижчі значення, трохи вищі за температуру кипіння води.

Рівень води покривав стінку в місці розташування термопар ТС-4 (внизу) і ТС-3 (ззаду). Верхня поверхня (ТС-2) не контактувала з рідиною, але, охолоджувалася краплями води, що виривалися з киплячої води, тому максимальна температура була трохи нижчою, ніж у випадку на рис. 4. Нарешті, передня термопара (ТС-1) знаходилася саме на висоті, що відповідала рівню води, досягаючи приблизно постійної і проміжної температури. Максимальна температура 375 °С для передньої термопари була досягнута після 9 хвилин впливу, а 400 °С для верхньої (тепер охолоджуючий ефект струменя був незначним). Натомість термопари на стінці під рівнем води мали максимальну температуру в 120 °С. Звичайно, якби вода текла з певною швидкістю, охолоджувальний ефект був би вищим.

**Висновки.** Аналіз історичних випадків довів, що даних про аварії, винуватцем яких є струменевий вогонь, дуже мало у відкритому доступі, але наслідки, до яких вони призводять у випадках паралельних труб чи труб близько лежачих, є дуже тяжкими. Доведено, що, якщо через маленький отвір, що утворився внаслідок корозії, зовнішнього втручання техніки або інших причин, відбувається витік горючого газу або двофазного потоку і він займається, то існує ймовірність потрапляння полум'я на другу трубу, а це може створити дуже небезпечну ситуацію.

Результати, отримані в ході експерименту, розробленого для проведення випробувань у приміщенні, показали, що вплив малих і середніх струменів вогню може спричинити дуже високі теплові потоки, що призводять до надзвичайно високих температур у стінці труби, якщо вона не має вогнезахисного покриття або воно пошкоджене. Температура сягала 600°C за 2-3 хвилини зі стоячим газом всередині труби, а за 5-6 хвилин досягала 750°C. В випадку, коли труба містила рідину, експеримент показав, що стінка труби, що контактувала з рідиною, мала змогу охолонуть, і температура стінки була значно меншою, роблячи ситуацію більш безпечною. Отже, ці викладки доводять, що дотримуватися безпечних відстаней при прокладанні труб в траншеях є обов'язковою вимогою разом з іншими заходами безпеки.

### Література:

- [1] ДБН В.2.5-20:2018. Газопостачання. Чинний від 2019-07-01. Київ: Мінрегіон України, 2018.
- [2] Korlapati NVS, Khan F, Noor Q, Mirza S, Vaddiraju S. Review and analysis of pipeline leak detection methods. *Journal of Pipeline Science and Engineering* 2022; 2:100074. <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2022.100074>.
- [3] Murvay PS, Silea I. A survey on gas leak detection and localization techniques. *J Loss Prev Process Ind* 2012;25:966–73. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2012.05.010>.
- [4] Zhao L, Cao Z, Deng J. A review of leak detection methods based on pressure waves in gas pipelines. *Measurement* 2024;236:115062. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115062>.
- [5] Huthwaite P, Ribichini R, Cawley P, Lowe M. Mode selection for corrosion detection in pipes and vessels via guided wave tomography. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control* 2013;60:1165–77. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2013.2679>.
- [6] Stajanca P, Chruscicki S, Homann T, Seifert S, Schmidt D, Habib A. Detection of leak-induced pipeline vibrations using fiber—optic distributed acoustic sensing. *Sensors* 2018;18:2841. <https://doi.org/10.3390/s18092841>.

- 
- 
- [7] Mohsin R., Majid Z., Yusof M. Safety distance between underground natural gas and water pipeline facilities Reliab \ R. Mohsin, Z. Majid, M. Yusof \ Eng. Syst. Safe. 2014. 131:53–60.
- [8] Mazzola A. Thermal interaction analysis in pipeline systems: a case study \ A. Mazzola \ J. Loss. Prevent. Proc. 1999. 12:495–505.
- [9] Hassan F., Iqbal J. Consequential rupture of gas pipeline \ F. Hassan, J. Iqbal \ Eng. Fail. Anal. 2006. 12:127–135.
- [10] Hassan F., Ahmed F. Metallurgical analysis of high pressure gas pipelines rupture \ F. Hassan, F. Ahmed \ Pak. J. Eng. Appl. Sci. 2007. 1:14–23.
- [11] Wang Z., Fu Z., Zou Y., Liu L., Liu H. Study on risk assessment of urban gas pipeline based on domino effect \ Z. Wang, Z. Fu, Y. Zou, L. Liu, H. Liu \ Int. Conf. Pipelines Trenchless Technol. 2011. 1720–1727
- [12] Silva E., Nele M., Frutuoso P. Underground parallel pipelines domino effect: An analysis based on pipeline crater models and historical accidents \ E. Silva, M. Nele, P. Frutuoso \ Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2016, 43:315-331. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.05.031>
- [13] Gas pipeline incidents, 12th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (egig.eu/report).
- [14] V. Foroughia V., Cavinib A., Palacios A., Albóa K., Àguedaa A., Pastora E., Casald J. Domino Effect by Jet Fire Impingement in Pipelines. C. Engineering Transactions. 2019. 77:931-936.
- [15] Palacios, A., Casal, J. Assessment of the shape of vertical jet fires, Fuel. 2011. 90:824-833.

#### References:

- [1] DBN V.2.5-20:2018. Gas Supply. Kyiv: Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine, 2018..
- [2] Korlapati NVS, Khan F, Noor Q, Mirza S, Vaddiraju S. Review and analysis of pipeline leak detection methods. Journal of Pipeline Science and Engineering 2022; 2:100074. <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2022.100074>.
- [3] Murvay PS, Silea I. A survey on gas leak detection and localization techniques. J Loss Prev Process Ind 2012;25:966–73. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2012.05.010>.
- [4] Zhao L, Cao Z, Deng J. A review of leak detection methods based on pressure waves in gas pipelines. Measurement 2024;236:115062. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115062>.
- [5] Huthwaite P, Ribichini R, Cawley P, Lowe M. Mode selection for corrosion detection in pipes and vessels via guided wave tomography. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control 2013;60:1165–77. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2013.2679>.
- [6] Stajanca P, Chruscicki S, Homann T, Seifert S, Schmidt D, Habib A. Detection of leak-induced pipeline vibrations using fiber—optic distributed acoustic sensing. Sensors 2018;18:2841. <https://doi.org/10.3390/s18092841>.
- [7] Mohsin R., Majid Z., Yusof M. Safety distance between underground natural gas and water pipeline facilities Reliab \ R. Mohsin, Z. Majid, M. Yusof \ Eng. Syst. Safe. 2014. 131:53–60.
- [8] Mazzola A. Thermal interaction analysis in pipeline systems: a case study \ A. Mazzola \ J. Loss. Prevent. Proc. 1999. 12:495–505.
- [9] Hassan F., Iqbal J. Consequential rupture of gas pipeline \ F. Hassan, J. Iqbal \ Eng. Fail. Anal. 2006. 12:127–135.
- [10] Hassan F., Ahmed F. Metallurgical analysis of high pressure gas pipelines rupture \ F. Hassan, F. Ahmed \ Pak. J. Eng. Appl. Sci. 2007. 1:14–23.
- [11] Wang Z., Fu Z., Zou Y., Liu L., Liu H. Study on risk assessment of urban gas pipeline based on domino effect \ Z. Wang, Z. Fu, Y. Zou, L. Liu, H. Liu \ Int. Conf. Pipelines Trenchless Technol. 2011. 1720–1727.

- [12] Silva E., Nele M., Frutuoso P. Underground parallel pipelines domino effect: An analysis based on pipeline crater models and historical accidents \E. Silva, M. Nele, P. Frutuoso\ Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2016, 43:315-331. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.05.031>
- [13] Gas pipeline incidents, 12th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group ([egig.eu/report](http://egig.eu/report)).
- [14] V. Foroughia V., Cavinib A., Palacios A., Albóa K., Àguedaa A., Pastora E., Casald J. Domino Effect by Jet Fire Impingement in Pipelines. C. Engineering Transactions. 2019. 77:931-936.
- [15] Palacios, A., Casal, J. Assessment of the shape of vertical jet fires, Fuel. 2011. 90:824-833.

## ON THE EFFECT OF FIRE ON PIPELINES

**S.Palchyk,**

[spalchyk@ukr.net](mailto:spalchyk@ukr.net), ORCID:0009-0000-0425-4719,

**V. Isaiev,**

[isaevv5@gmail.com](mailto:isaevv5@gmail.com), ORCID: 0000-0002-9947-728,

**V.Kiosak,**

[kiosakv@ukr.net](mailto:kiosakv@ukr.net), ORCID: 0000-0002-7433-6709,

*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture  
Didrikhson St., 4, Odessa, 65029, Ukraine*

**Abstract.** Emergency damage to a pipeline may lead to the occurrence of a fire. The nature of the flame can vary. This paper considers the case of a jet flame. The impact of a jet flame is often underestimated, since there are fairly effective methods for combating this phenomenon, and it is believed that it does not require immediate action to prevent unforeseen consequences. However, if a parallel pipeline or containers with flammable products are located nearby, a domino effect may occur, i.e., damage to the pipeline, ignition of transported products, equipment, as well as threats to human life and buildings.

This work presents results obtained during an experimental study of the impact of an acoustic jet flame on a pipe containing stagnant gas or water. Using sensors, the temperature of the flame impinging on a pipe located at a fixed distance was studied. Temperature changes were examined as a function of heating time, fire intensity, and position on the pipe. After 19.5 s, an initial increase in the air temperature inside the pipe to about 20 °C was recorded; after 150 s it rose to a maximum of 600 °C, and to about 800 °C after approximately 360 s. In the second stage of the experiment, when the pipe contained water, the heating rate in the wall region in contact with the liquid was significantly lower than in the first stage of the experiment. The maximum temperature reached only about 150 °C. Based on the temperatures of the jet flame and the pipe, the heat fluxes reaching the pipe and the corresponding heat transfer coefficients were determined. The study demonstrated the necessity of investigating the effects of jet flames to ensure fire protection, in particular by providing a safe distance between pipelines. The obtained results can be applied to modeling the possibility of chain (domino) damage effects in pipeline networks.

**Keywords:** jet fire; flame impact; domino effect; heat flux; pipeline.

Стаття надішла до редакції 10.02.2026

Стаття прийнята до друку 27.02.2026

Дата публікації статті 31.03.2026

[This work](#) © 2026 by [С.С. Пальчик, В.Ф. Ісаєв, В. Кіосак](#) is licensed under [CC BY 4.0](#)