

УДК 614.8

Ю. П. Ключка¹, д.т.н., с.н.с., проф. каф. (ORCID 0000-0003-1066-4217)

Д. О. Дорошенко², пров. фах. відділу (ORCID 0000-0003-4222-9359)

*¹Харківський національний університет міського господарства
імені О.М. Бекетова, Харків, Україна*

²Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НАГРІВАННЯ БАЛОНІВ З ГАЗОМ «ПРОПАН-БУТАН» У ЖИТЛОВИХ БУДІВЛЯХ

Проведено дослідження балонів з газом пропан-бутан та розроблена математична модель для прогнозування поведінки таких систем під впливом температури. На першому етапі встановлено, що частка тепла, необхідного для нагріву газу, становить від 0,73 до 0,8, а матеріал балону може поглинати від 20 % до 100 % тепла, що суттєво впливає на динаміку прогріву. Для балонів об'ємом 12,7 та 26,2 л лише при коефіцієнті заповнення 0,24 та 0,36, відповідно, кількість необхідного тепла для нагріву газу перевищує кількість для нагріву балону. Дані результати свідчать про значний внесок безпосередньо матеріалу балону в поглинання тепла під час нагрівання балону. На другому етапі розглянуто актуальну проблему безпеки житлових та промислових об'єктів, спричинену широким використанням пропан-бутану, який є легкозаймистою та вибухонебезпечною речовиною. Увага приділена ризикам, пов'язаним з нагріванням балонів з пропан-бутаном, що може призвести до підвищення тиску та розгерметизації, викликаючи вибух за сценарієм BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion). Обґрунтовано необхідність розробки математичної моделі, яка б дозволяла прогнозувати зміну температурного режиму компонентів балону (стінок, рідини та газу) та тиску пропан-бутану в ньому в реальному часі під впливом зовнішніх факторів, враховуючи складні процеси теплообміну. Розроблена модель ґрунтується на рівнянні нестационарної теплопровідності для корпусу балону з граничними умовами третього роду на зовнішній і внутрішній стінці балона. При побудові моделі враховуються властивості матеріалу балону (теплопровідність, теплоємність, щільність, коефіцієнт теплового розширення), його геометрія (площа поверхні, товщина стінок, форма) тощо. Отримана модель в подальшому дозволить оцінювати температурний розподіл у стінці балону, прогнозувати критичні значення до руйнування та можливого вибуху.

Ключові слова: пропан-бутан, нагрівання, нестационарна теплопровідність, вибух, балон, надзвичайна ситуація

1. Вступ

Пропан-бутан завдяки своїм енергетичним властивостям та відносній доступності, широко застосовується як у побуті, так і в промисловості. Проте, незважаючи на його переваги, він є легкозаймистою та вибухонебезпечною речовиною, що створює значні ризики у разі порушення умов його зберігання, транспортування або експлуатації [1].

У період військової агресії РФ, населення України активно використовує пропан-бутан для приготування їжі, а в деяких випадках і для опалення, що пов'язано з періодичними вимкненнями світла [3, 4]. Це створює додаткові ризики, адже пожежовибухонебезпека балонів з пропан-бутаном, зокрема їх розгерметизація через підвищення тиску та температури, що може призвести до вибуху та визначається кількома ключовими факторами.

По-перше, інциденти, пов'язані з вибухами газу, регулярно стаються по всьому світу, спричиняючи значні матеріальні збитки, руйнування інфраструктури та, найтрагічніше, людські жертви.

По-друге, одним з критичних сценаріїв, що може ініціювати вибух пропан-бутану, є його нагрів, який призводить до підвищення тиску всередині ємності та, як наслідок, до її розгерметизації. Такий процес може розвиватися за сценарієм

BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion – вибух випаровування рідини, що кипить та розширюється), який характеризується надзвичайною руйнівною силою та великою площею ураження.

По-третє, поточні методи оцінки ризиків та інженерні рішення щодо запобігання газовим вибухам потребують постійного вдосконалення [2]. Це стосується як удосконалення матеріалів для виготовлення газових балонів, так і розробки ефективних систем моніторингу, вентиляції та пожежогасіння.

Таким чином проблема моделювання цих систем та розуміння температурних режимів, що викликають критичне підвищення тиску, є життєво важливим для розробки попереджувальних заходів. А дослідження, спрямовані на моделювання поведінки пропан-бутану при нагріві, а також на аналіз наслідків його розгерметизації та вибуху, дозволять розробляти більш надійні та безпечні системи.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В [1] було проведено аналіз наслідків вибухів у житлових будівлях та проведено оцінку часу утворення вибухонебезпечної концентраційної межі поширення полум'я за стаціонарних умов. Тобто автори не враховують можливу зміну температури системи під впливом зовнішніх факторів.

В [5] було наведено проміжні результати експериментальних досліджень щодо динаміки зміни температури та тиску газу при переміщенні балону з відкритого простору з температурою менше 273 К в приміщення. Окрім експериментальних даних наведені також термограми. Поряд з цим відсутні будь які аналітичні залежності, котрі могли б говорити про прогнозування поведінки таких систем.

В роботі [6] розглядаються методологічні аспекти дослідження техногенних вибухів з фокусом на розрахункових методах для визначення їх механізму в рамках судово-експертної практики. Актуальність роботи обґрунтована інтеграцією горючих та вибухонебезпечних речовин у сучасні виробничі та побутові процеси, що обумовлює необхідність превентивних заходів та детального аналізу аварійних подій. У роботі систематизовано розрахункові моделі для аналізу техногенних вибухів у відкритих умовах, приміщеннях та обмежених об'ємах. Представлено математичний апарат для оцінки ключових параметрів, таких як надлишковий тиск (кПа), тротильовий еквівалент вибуху (кг), та радіус ураження, що визначає потенційну руйнівну дію на будівельні конструкції та загрозу для життя.

Особлива увага приділена динаміці розповсюдження газопароповітряних сумішей та визначенню їх концентраційних меж поширення полум'я. Для цього використовуються формули для розрахунку середньої фактичної концентрації газу в приміщенні

$$\phi'_{\text{сер}} = \frac{m_f}{V_{\text{прим}}(1-\eta)} = \frac{m_f}{V_{\text{вільн}}}, \text{кг} \cdot \text{м}^{-3} \quad \text{або} \quad \phi_{\text{сер}} = \frac{100m}{V_{\text{вільн}} \rho_{\text{г}}}, \% \quad (1)$$

де: $\phi'_{\text{сер}}$, $\phi_{\text{сер}}$ – відповідно масова й об'ємна середня фактична концентрація газу у вільному об'ємі приміщення; m_f – маса газу, що надійшла до приміщення за час аварійної ситуації, кг; $V_{\text{прим}}$ – загальний об'єм приміщення, м^3 ; η – частка об'єму приміщення, зайнята обладнанням або меблями; $V_{\text{вільн}}$ – вільний об'єм приміщення, м^3 .

В той же час в роботі параметри системи розглядаються як статичні без можливої зміни температури та підвищення тиску в системі.

Робота [7] присвячена експериментальному дослідженню небезпек, пов'язаних з витоками газу метану та вибухами в повномасштабній житловій будівлі, з акцентом на поведінку неоднорідних газоповітряних сумішей. Хоча вибухи в гомогенних сумішах добре вивчені, реальні сценарії часто характеризуються утворенням неоднорідних сумішей через різницю в густинах метану та повітря. В дослідженні моделюються процеси витоку газу та вибуху в умовах реального житлового приміщення. Розроблено модель розподілу газу у великих просторах, яка базується на апроксимації безрозмірної плавучості як функції безрозмірної висоти та безрозмірного часу. Ця модель дозволяє кількісно описувати формування градієнтних шарів метану в приміщенні. Основні результати показують, що вибухи в неоднорідних сумішах демонструють специфічні характеристики, які відрізняються від гомогенних вибухів. Експерименти виявили вплив локалізації витоку, вентиляції та геометрії приміщення на розподіл газу та динаміку вибуху. Отримані дані є критично важливими для підвищення точності чисельного моделювання вибухів (наприклад, за допомогою програм FLACS) та розробки більш ефективних стратегій безпеки та зменшення ризиків у житлових будівлях. В роботі не розглядаються механізми утворення вибухонебезпечної концентрації та не розглядається поведінка газів, важчих за повітря.

В [8] наведено детальний аналіз руйнувань залізобетонної будівлі внаслідок вибуху зрідженого нафтового газу (LPG), що стався в місті Шанлиурфа, Туреччина. Це дослідження є важливим для розуміння поведінки будівельних конструкцій під впливом вибухових навантажень та розробки методів їх оцінки та проектування для підвищення стійкості. У роботі проведено комплексний аналіз причин вибуху LPG та оцінено його наслідки для триповерхової залізобетонної будівлі. Визначено, що вибух стався в підвалі, спричинивши значні пошкодження конструктивних елементів, включаючи руйнування колон та стін. Розслідування даного випадку є досить актуальним, однак його досить складно адаптувати до житлових будівель, так як інші будівельні вимоги, відсутність отворів, стін та й масштаб бочки з пропан-бутаном є в 1000 разів більшим за балон з газом.

В [9] проведено аналіз ризику несправності в системі запобіжний клапан – резервуар з пропан-бутаном (LPG). Основною метою цього вивчення є аналіз небезпеки витоку пропан-бутанового газу для системи запобіжний клапан – резервуар LPG та розробка корисного методу для швидкого виявлення небезпеки невідповідності запобіжного клапана. Результати аналізу дослідження підтвердили, що запобіжні клапани є базовим захистом установки (резервуара) від несправностей, які можуть призвести до людських жертв, матеріальних збитків та подальших небажаних витрат, спричинених їхньою ненадійністю. В той же час у роботі відсутні будь-які аналітичні залежності, котрі б показали вплив часу, температури на спрацювання запобіжного клапану та формування вибухонебезпечних концентрацій.

Робота [10] присвячена дослідженню ефективності використання газових перегородок (baffles) для запобігання та контролю ризиків, пов'язаних з витоками газу та вибухами в комунальних тунелях. Проблема витоків та вибухів газу в підземних інфраструктурних об'єктах є критично важливою через високу ймовірність катастрофічних наслідків. У роботі застосовано комбінований підхід, що включає чисельне моделювання (CFD, computational fluid dynamics) та експериментальні дослідження для аналізу впливу газових перегородок на дифузію газу, ефективність вентиляції та параметри вибуху. Також було проведено дослідження динаміки поширення витоку газу в тунелі та формування вибухонебезпечних

концентрацій. Моделювання дозволяє візуалізувати зони накопичення газу та оцінити час досягнення нижньої та верхньої меж вибухонебезпечних концентрацій. Результати дослідження демонструють, що використання газових перегородок може значно підвищити рівень безпеки в комунальних тунелях, забезпечуючи більш ефективний контроль над витоками газу та обмежуючи потенційні руйнівні наслідки вибухів. В роботі розглядається варіант з різким збільшенням концентрації метану в тунелі та утворенням вибухонебезпечної концентрації, що не в повній мірі повторює процеси котрі можуть відбуватися з пропан бутаном в значно менших приміщеннях.

У статті [11] розглядається проблема оцінки ризиків у системі постачання газу. У дослідженні проведено системний аналіз ризиків, пов'язаних з різними етапами постачання газу, включаючи видобуток, транспортування, зберігання та розподіл. Розглянуто основні джерела небезпеки, такі як несправності обладнання, людський фактор, природні явища та терористичні загрози. Стаття акцентує увагу на важливості впровадження ефективних систем управління ризиками, що включають заходи з попередження аварій, мінімізації наслідків та відновлення. В той же час в роботі не розглядаються будь-які кількісні показники чи параметри, що не дозволяє говорити про реальну оцінку ризиків.

У статті [12] розглядається судово-інженерний аналіз вибуху, який був спричинений надмірним заповненням пропанового балона. Дослідження базується на методології NFPA 921 "Посібник з розслідування пожеж та вибухів". Проведено інженерний аналіз показань свідків, карт дугового розряду (arc mapping), динаміки пожежі та оцінки характеру пожежних пошкоджень. Причини вибуху оцінювалися з урахуванням NFPA 921, а також застосування інженерного аналізу та розрахунків. Основна увага приділяється гіпотезі про надмірне заповнення пропанового балона як причини інциденту. Аналіз включає вивчення поведінки пропану при зміні температури та тиску, а також функціонування запобіжних клапанів. В даній роботі також не розглядаються будь-які кількісні показники чи параметри, що можуть характеризувати зміну параметрів балону. Також автором не проводиться моделювання системи з підвищення тиску.

У статті [13] представлено базові принципи щодо розвитку пожеж та вибухів. Описуються стадії розвитку пожежі, від початкового займання до повного вигорання, з урахуванням впливу вентиляції, паливного навантаження та геометрії приміщення. Однак в роботі не розглядаються ситуації з впливом пожежі на балони з газом або ж виникнення пожежі чи вибуху в результаті розгерметизації балону.

У статті [14] досліджується безпека житлових будівель під впливом вибухових навантажень від газу. Автори зазначають, що вибух газу, через свою складність та потенційні наслідки, є предметом численних аналізів, оскільки вибухи в обмеженому просторі можуть мати різноманітні наслідки як для мешканців, так і для самої конструкції. Метою цього дослідження є аналіз можливостей захисту конструкції будівлі від наслідків вибуху газу. Аналіз проводився на основі двох аварій, що сталися в житлових будинках. Ключовим аспектом, що розглядається, є ефективність вентиляції як методу захисту будівельних конструкцій. Цей процес спрямований на створення напіввідкритого простору для поширення полум'я, що забезпечує зниження пікового значення тиску вибуху. У житлових будівлях вікна можуть виступати потенційними вентиляційними отворами. Не дивлячись на актуальність роботи автори не наводять тип газу, що приймав участь у вибуху та особливості його утворення, що унеможливорює аналіз чи прогнозування таких НС.

У роботі [15] досліджуються механізми газових вибухів у житлових приміщеннях, зосереджуючись на впливі взаємопов'язаних кімнат та перешкод, а також на інтерпретації термічних пошкоджень. Робота має на меті заповнити прогалини у розумінні динаміки вибухів газу в складних архітектурних конфігураціях. Дослідження базується на кількох експериментальних програмах:

- випробування вибухів газу з вентиляцією у багатосекційній камері (випробування, проведені в 1984 році, були спрямовані на вивчення поширення полум'я між приміщеннями та характеристику термічних пошкоджень після вибуху газу);
- випробування вибухів з вентиляцією в камері об'ємом 180 м³ з масивами перешкод (випробування проведені в 1993 році, ці експерименти мали на меті охарактеризувати поведінку вибуху в присутності перешкод).

Не дивлячись на те, що отримані результати мають важливе значення для покращення моделей прогнозування вибухів, розробки більш ефективних систем безпеки та підвищення точності судових експертиз у справах, пов'язаних з газовими вибухами в житлових приміщеннях в роботі не досліджуються шляхи досягнення пожежовибухонебезпечних ситуацій в приміщенні.

В результаті аналізу встановлено, що на сьогодні відсутня динамічна та проста математична модель, яка б дозволяла достовірно прогнозувати зміну температурного режиму компонентів балону (стінок, рідини та газу) та, що найважливіше, тиску пропан-бутану в ньому в реальному часі з метою прогнозування можливого руйнування та вибуху газу.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є розробка математичної моделі теплового стану та тиску в балоні з пропан-бутановою сумішшю, яка дозволить прогнозувати поведінку системи під впливом змінних зовнішніх умов з урахуванням теплообмінних процесів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- проаналізувати та оцінити вплив безпосередньо балону на теплофізичні властивості системи з пропан-бутановою сумішшю;
- сформулювати систему диференціальних рівнянь теплового балансу з урахуванням теплообміну між компонентами системи та із зовнішнім середовищем.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є балон з пропан-бутановою сумішшю, що функціонує як динамічна багатофазна термодинамічна система, яка перебуває у постійному енергетичному та масообмінному взаємозв'язку із зовнішнім середовищем.

Предметом дослідження є динаміка розподілу температури між стінками балону, рідкою та газоподібною фазами пропан-бутану, а також еволюція тиску всередині балону під впливом коливань зовнішньої температури.

Гіпотезою дослідження є суттєвий вплив корпусу балону на теплофізичні властивості системи з пропан-бутановою сумішшю та необхідність врахування даних параметрів при створенні моделі.

Для створення ефективної математичної моделі нагріву балону з пропан-бутаном, яка враховує динаміку температури різних компонентів та фазові переходи, застосовується комплекс дослідницьких методів.

На початковому етапі проводиться системний аналіз об'єкта та предмета дослідження. Це передбачає: визначення меж системи, ідентифікацію ключових факторів, виявлення взаємозв'язків, формулювання припущень.

Методи математичного моделювання, що дозволяють кількісно описати фізичні процеси, а саме: Метод зосереджених параметрів, рівняння теплового балансу, термодинамічні рівняння стану.

5. Розробка математичної моделі нагріву балону

5.1. Порівняння теплоємності балону та газу в ньому

При побудові математичної моделі з оцінки динаміки зміни температури газу в балоні доцільно скористатися рівнянням нестационарної теплопровідності для стінки балону. Складність розрахунків та відсутність можливості побудови аналітичної залежності потребує порівняння теплоємності балону та газу в ньому та підтвердження суттєвого внеску балону в інерційність системи.

З метою оцінки необхідності врахування теплоємності композитного балону без газу та газу окремо проведемо розрахунки. Результати дозволять зробити висновок про доцільність врахування балону, або ж це призведе до спрощення математичної моделі. Вихідні дані для розрахунків наведені в табл. 1.

Табл. 1. Характеристики композитних балонів [16]

№ з/п	Об'єм балону, л	Маса балону, кг	Максимальна місткість пропану, кг (суміш С), кг	Максимальна місткість бутану (суміш А), кг	Суміш А1, кг
1	12,7	3,7	5,33	6,35	5,84
2	18,2	4,3	7,64	9,10	8,37
3	24,5	5	10,24	12,20	11,22
4	26,2	5,1	11	13	12

На рис.1. наведено залежність кількості теплоти, необхідної для нагріву балону та газу в залежності від температури в приміщенні.

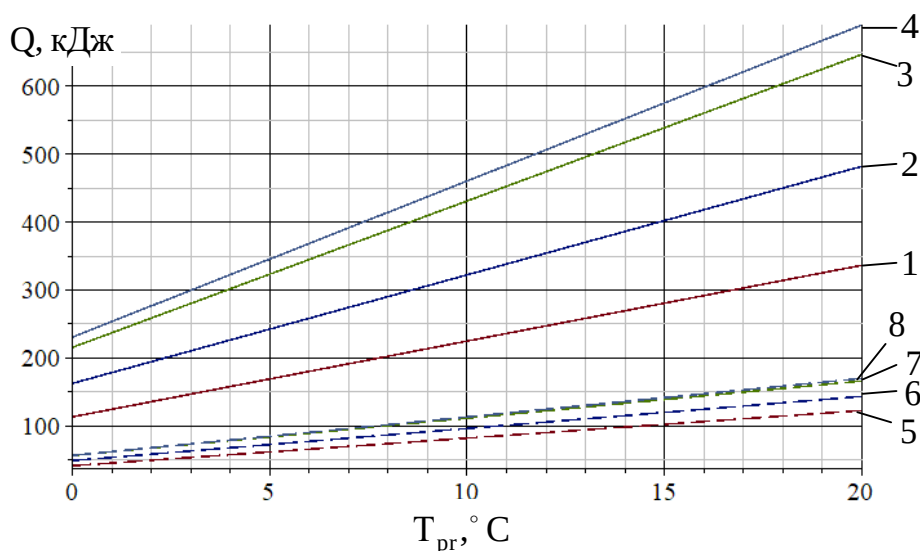


Рис. 1. Залежність кількості теплоти необхідної для нагріву балону та газу в залежності від температури в приміщенні: 1, 5 – №1 табл.1; 2, 6 – №2 табл.1; 3, 7 – №3 табл.1; 4, 8 – №4 табл.1; суцільні лінії – LPG; пунктирні лінії – балон

Аналіз рисунку показує, що частка тепла необхідного для нагрівання саме газу складає від 0,73 до 0,8. Тобто при заповненому балоні на нагрів матеріалу балону може витрачатися близько 20 % тепла.

На наступному етапі було оцінено вплив ступеня заповнення балону на співвідношення необхідної кількості тепла для нагріву балону та газу. Результати наведені на рис. 2 та 3.

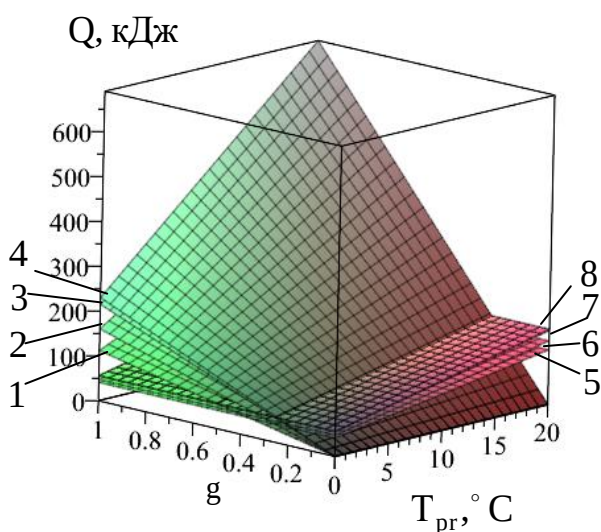


Рис. 2. Залежність кількості теплоти необхідної для нагріву балону та газу в залежності від температури в приміщенні та ступеня заповнення: 1, 5 – № 1 табл. 1; 2, 6 – № 2 табл. 1; 3, 7 – № 3 табл. 1; 4, 8 – № 4 табл. 1; 1-4 – LPG; 5-8 – балон

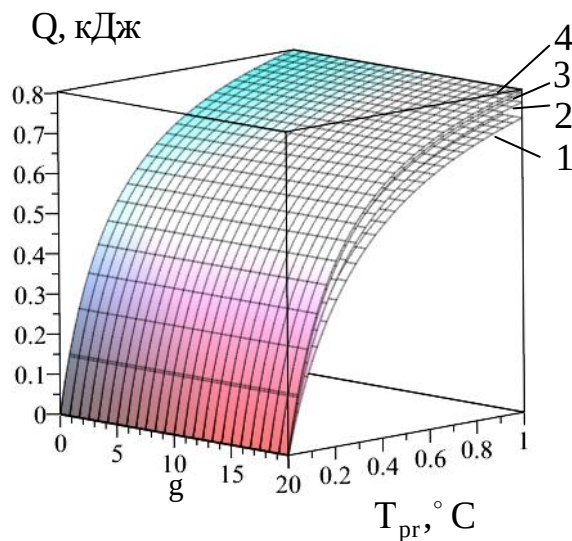


Рис. 3. Частка теплоти необхідної для нагріву газу в загальному обсязі від температури в приміщенні та ступеня заповнення: 1 – № 1 табл. 1; 2 – № 2 табл. 1; 3 – № 3 табл. 1; 4 – № 4 табл. 1

Аналіз рисунків показує, що балон може поглинати значний відсоток (від 20 % до 100 %) кількості тепла необхідного для нагріву балону та газу, і, відповідно, це впливатиме на динаміку прогріву.

Таким чином підтверджено суттєвий вплив корпусу балону на кількість тепла необхідного для нагріву балону та газу в балоні, що необхідно врахувати при створенні математичної моделі.

5.2. Побудова розрахункової схеми нагріву балону та математичної моделі

При створенні математичної моделі нагріву балону з пропан-бутаном при зміні зовнішньої температури слід розглянути комплекс фізичних явищ та властивостей матеріалів. Серед них можна виділити наступні властивості балону:

- матеріал балону:
 - теплопровідність (різні матеріали мають різну теплопровідність, що впливає на швидкість передачі тепла від зовнішнього середовища до газу всередині);
 - теплоємність (властивість матеріалу поглинати тепло);
 - щільність (важлива для розрахунку теплової інерції балону);
 - коефіцієнт теплового розширення (хоча його вплив на загальний об'єм балону може бути незначним, він може бути важливим для точних розрахунків напружень);
- геометрія балону:
 - площа поверхні (чим більша площа поверхні, тим більша площа контакту із зовнішнім середовищем і тим швидше відбувається теплообмін);

- товщина стінок (товстіші стінки матимуть більшу теплову інерцію та повільніше реагуватимуть на зміни температури);
- Форма (циліндрична форма є типовою, але наявність вигинів або нерівностей може незначно впливати на конвекцію);
- емісійна здатність та коефіцієнт поглинання поверхні (колір та стан поверхні балону (глянцева, матова, пофарбована) впливають на поглинання сонячної радіації та випромінювання тепла).

Поряд з властивостями балону слід врахувати властивості пропан-бутану, серед яких: фазовий стан (пропан-бутан у балоні знаходиться у двох фазах: рідкій та газоподібній); теплоємність, теплопровідність та густину; в'язкість (може впливати на конвекцію всередині балону, хоча цей ефект може бути менш значущим, ніж інші).

В процесі розгляду теплообмінних процесів слід дослідити такі явища:

- конвекція (теплообмін між поверхнею балону та навколишнім повітрям);
- випромінювання (теплообмін між поверхнею балону та навколишніми об'єктами (земля, будівлі, небо));
- теплопровідність (передача тепла через стінки балону від зовнішньої поверхні до газу/рідини всередині).

Також можна розглядати:

- об'єм газу/рідини у балоні (кількість газу та рідини впливає на теплоємність системи та динаміку нагріву);
- наявність інертних газів (хоча пропан-бутан є основним компонентом, наявність невеликих домішок інших газів може незначно впливати на теплофізичні властивості суміші);
- наявність ізоляції (якщо балон ізольований, це значно зменшить швидкість теплообміну із зовнішнім середовищем).

В той же час не завжди потрібно враховувати всі можливі фактори, оскільки це може призвести до надмірної складності моделі без істотного покращення її точності. Рішення про те, які фактори включити, залежить від конкретних цілей моделювання, доступних ресурсів та необхідної точності. Деякі фактори можуть мати незначний вплив на кінцевий результат порівняно з основними рушійними силами, такими як зовнішня температура, а їхнє врахування лише збільшить обчислювальне навантаження та час розробки. Крім того, якщо дані для певних факторів є неточними або їх важко отримати, їх включення може фактично внести більше похибок, ніж користі, погіршуючи передбачувальну силу моделі. Тому, для отримання функціональної та ефективної моделі, яка відповідає поставленим завданням, доцільно зосередитися на ключових фізичних процесах та властивостях, які мають найбільший і найочевидніший вплив на динаміку температури та тиску в балоні.

Спрощену схему балону під час нагріву газу в приміщенні можна представити у вигляді рис. 4.

В такому разі рівняння теплопровідності для корпусу балону можна записати в наступному вигляді [17]

$$\frac{\partial}{\partial \tau} T(r, \tau) = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} T(r, \tau) + \frac{\frac{\partial}{\partial r} T(r, \tau)}{r} \right), \quad (2)$$

де α – коефіцієнт температуропровідності; $T(r, \tau)$ – величина температури в точці на відстані r в момент часу τ .

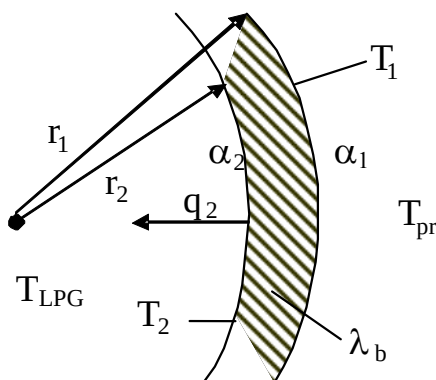


Рис. 4. Розрахункова схема нагріву стінки балону: λ_b – коефіцієнт теплопровідності матеріалу балону; T_{LPG} , T_{pr} – температура газу та температура в приміщенні; r_1 , r_2 – зовнішній та внутрішній радіус балону; T_1 , T_2 – температура зовнішньої та внутрішньої стінки балону; α_1 , α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої та внутрішньої стінки балону; q_2 – тепловий потік від внутрішньої стінки

Приймемо граничні умови третього роду на зовнішній і внутрішній стінці балона. Тоді можна записати

$$\lambda_b \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=r_1} = \alpha_1 (T_{pr} - T_1); \quad (3)$$

$$\lambda_b \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=r_2} = \alpha_2 (T_2 - T_{LPG}). \quad (4)$$

Початкові умови можна записати

$$T(r, 0) = T_0, \quad (5)$$

Також слід враховувати, що T_{LPG} і q_2 взаємопов'язані, тобто

$$T_{LPG} = f(S_{wb}, T_2, m_{LPG}, \alpha_2), \quad (6)$$

де S_{wb} – площа, через яку проходить тепловий потік q_2 ; m_{LPG} маса газу в балоні.

Коефіцієнт тепловіддачі в балоні можна визначити, виходячи з виразу [18]

$$Nu = \frac{\alpha_2 \cdot L}{\lambda_{LPG}}, \quad (7)$$

де Nu – критерій подоби теплових процесів, що характеризує співвідношення між інтенсивністю теплообміну за рахунок конвекції та інтенсивністю теплообміну за рахунок теплопровідності; α_2 – коефіцієнт тепловіддачі; λ_{LPG} – коефіцієнт теплопровідності; L – характерний розмір.

Усереднене значення $\overline{Nu}$ для випадку вільної конвекції в можна визначати відповідно до виразу

$$\overline{Nu} = \left[0,6 + \left(0,387 \frac{Gr \cdot Pr}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{16/9}} \right)^{1/6} \right]^2, \quad Gr \cdot Pr \in (10^{-5}; 10^{12}), \quad (8)$$

де Pr – критерій подоби теплових процесів у рідинах і газах, що враховує вплив фізичних властивостей теплоносія на тепловіддачу ($0,75 < Pr < 1$ для багатоатомних газів [18]); Gr – критерій подоби теплообміну при вільному русі у полі гравітації.

Значення Gr визначалося відповідно до виразу

$$Gr = \frac{g\beta(T_2 - T_{LPG})L^3}{\nu^2}, \quad (9)$$

де: g – прискорення вільного падіння, $g=9,81$ м/с²; L – визначальний лінійний розмір поверхні теплообміну, м; T_2 – температура поверхні теплообміну, К; T_{LPG} – температура, К; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с; β – температурний коефіцієнт об'ємного розширення. Для газів $\beta = (T_{LPG})^{-1}$, К⁻¹.

Коефіцієнт кінематичної в'язкості визначається відповідно до

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad (10)$$

де η – коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с.

Тоді, з урахуванням (2–10) математичну модель можна представити у вигляді (11).

З метою рішення системи (11) планується розбиття простору часу на невеликі кроки. Потім застосування рівнянь теплового балансу до кожного елемента на кожному часовому кроці на основі рішення рівняння нестационарної теплопровідності.

З метою рішення системи (11) планується розбиття простору часу на невеликі кроки. Потім застосування рівнянь теплового балансу до кожного елемента на кожному часовому кроці на основі рішення рівняння нестационарної теплопровідності.

6. Обговорення результатів розробки математичної моделі з оцінки параметрів балонів з пропан-бутаном

Отримані результати щодо оцінки впливу корпусу балону на систему в цілому показали, що існує суттєвий вплив теплоємності матеріалу балону на термодинамічні процеси системи, та складає від 20 % до 100 % в залежності від ступеня заповнення системи. Дані результати пояснюються відносно невеликою масою газу, його щільністю та теплоємністю. З іншого боку відносно великою масою балону, Fire Safety. DOI: 10.52363/2524-0226-2025-41-13

особливо при його частковому заповненні газом.

Отримані результати, а саме розроблена математична модель, дозволяють провести моделювання балону з газом та отримати проміжні значення на різних етапах моделювання.

Особливістю запропонованого підходу є: врахування геометричних параметрів балону; розрахунок на основі рівняння нестационарної теплопровідності, що в повній мірі дозволяє отримати комплекс всіх величин на протязі всього часу моделювання; можливості врахування типу газової суміші в залежності від сезону року, тощо.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial \tau} T(r, \tau) = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} T(r, \tau) + \frac{\frac{\partial}{\partial r} T(r, \tau)}{r} \right), \\ \lambda_b \frac{\partial}{\partial r} T(r, \tau) \Big|_{r=r_1} = \alpha_1 (T_{pr} - T_1), \\ \lambda_b \frac{\partial}{\partial r} T(r, \tau) \Big|_{r=r_2} = \alpha_2 (T_2 - T_{LPG}), \\ T(r, 0) = T_0, \\ T_{LPG} = f(S_{wb}, T_2, m_{LPG}, \alpha_2), \\ Nu = \frac{\alpha_2 \cdot L}{\lambda_{LPG}}, \\ Gr = \frac{g\beta(T_2 - T_{LPG})L^3}{\nu^2}, \\ \nu = \frac{\eta}{\rho}, \\ P_{LPG} = \varphi(T_{LPG}, m_{LPG}). \end{array} \right. \quad (11)$$

Дослідження обмежується рівномірним впливом температурного потоку на всю поверхню балону. Також модель передбачає вирішення рівняння нестационарної теплопровідності для циліндричної системи. Не враховуються як сферичні чи плоскі частки балону.

Серед недоліків вкажемо на прийняття усереднених параметрів балонів, характеристик газу в балоні у зв'язку з великим вибором їх на ринку та варіативністю складу газу в балоні.

Розвиток даного дослідження полягає в детальному дослідженні математичної моделі, розробці спрощених підходів до оцінки зміни температурного режиму балону та тиску в ньому, а також розробці регресійних моделей. На основі отриманих результатів також будуть розроблені номограми для оперативного визначення часу ймовірного руйнування балону та можливого вибуху.

Поряд з цим доцільно провести експериментальні дослідження для підтвердження математичної моделі. При цьому необхідно на високому рівні забезпечити безпеку проведення експерименту з використанням вибухонебезпечного газу.

7. Висновки

1. Встановлено, необхідність врахування впливу корпусу балону на теплові процеси, оскільки аналіз показав, що матеріал балону може поглинати від 20 % до 100 % тепла, необхідного для його нагріву та нагріву газу, що суттєво впливає на динаміку прогріву системи. На рис. 3. наведені результати розрахунків. Для балонів об'ємом 12,7 та 26,2 л лише при коефіцієнті заповнення 0,24 та 0,36, відповідно, кількість необхідного тепла для нагріву газу перевищує кількість для нагріву балону.

2. Сформульовано систему диференціальних рівнянь для визначення параметрів газу в балоні на основі рівняння нестационарної теплопровідності. Це дасть змогу оцінювати температурний розподіл у стінці балону та прогнозувати критичні значення, що можуть призвести до його руйнування та вибуху. Математична модель базується на рівнянні нестационарної теплопровідності для корпусу балону з граничними умовами третього роду на зовнішній і внутрішній стінці, що забезпечує її відповідність реальним фізичним процесам теплообміну при температурах в приміщенні (до 60 °C). Вона обмежується рівномірним впливом температурного потоку на всю поверхню балону. Також модель передбачає вирішення рівняння нестационарної теплопровідності для циліндричної системи, але в подальших дослідженнях буде проведена оцінка похибки з урахуванням сферичних та плоских частин балону.

Література

1. Дорошенко Д. О., Ключка Ю. П., Михайлюк О. П. Аналіз наслідків вибухів та умов утворення газоповітряних сумішей у житлових будівлях. Проблеми пожежної безпеки. 2020. Вип. 48. С. 37–44. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ppb_2020_48_8
2. ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013 Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику (ІЕС/ISO 31010:2009, IDT). URL: <https://khoda.gov.ua/image/catalog/files/dstu%2031010.pdf>
3. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 12 місяців 2024 року. Київ, 2025. С. 39. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/2/3/0/1/6/1/2/analitichna-dovidka-pro-pozezi-za-12-misiaciv-2024-na-sait.pdf>
4. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 12 місяців 2023 року. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/2/0/2/2/3/2/1/2023-rik.pdf>
5. Ключка Ю. П., Дорошенко Д. О. Експериментальна оцінка тиску пропан-бутану в балоні при його нагріванні. Сталий розвиток міст: пост воєнний період: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. 2025. С. 237–239. URL: https://science.kname.edu.ua/images/dok/konferentsii/stalyirozvytok2019/2025/C_3_Budivelna_ta_civilna_inzeneria_25.pdf
6. Гусейнов Р. Н., Панчук Ю. В. Основні розрахункові методи дослідження обставин і механізму техногенних вибухів. Теорія та практика судової експертизи і криміналістики. 2021. № 23. С. 258–269. doi: 10.32353/khrife.1.2021.20
7. Chengjun Y., Li C., Li Zh., Feng B., Ruizhi Xu. Research on the hazards of gas leakage and explosion in a full-scale residential building. Defence Technology. 2025. Vol. 43. P. 168–181. doi: 10.2139/ssrn.4770361
8. Turgut P., Gurel M., Pekgokgoz R. LPG explosion damage of a reinforced concrete building: A casestudy in Sanliurfa, Turkey. Engineering Failure Analysis. 2013. Vol. 32. P. 220-235. doi: 10.1016/j.engfailanal.2013.04.004

9. Krzysiak Z., Samociuk W., Bartnik G., Plizga K., Dziki D., Kaliniewicz Z., Nieoczym A., Wyciszkievicz A., Otto T. Analysis of tank safety with propane-butane on LPG distribution station. *Pol. J. Chem. Technol.* 2017. Vol. 19. P. 99–102. doi: 10.1515/pjct-2017-0074
10. Baobin G., Wenjie Z., Chuangnan R., Shaopeng S., Chenhui G. Study of the effect of gas baffles on the prevention and control of gas leakage and explosion hazards in autility tunnel. *Applied Sciences.* 2023. Vol. 13. Isse 7. P. 1–19. doi: 10.3390/app13074264
11. Ismail M., Sharif K., Udin Z., Hassan M., Nawi M., Hamid Z., Ibrahim J., Othman A. A risk assessment in natural gas supply. *International Journal of Supply Chain Management.* 2018. Vol.7. №4. P. 180-184. doi: 10.59160/ijscm.v7i4.2371
12. Tindal J. Forensic engineering analysis of an explosion allegedly caused by an overfilled propane cylinder. *Journal of the NAFE.* 2018. Vol. 35. № 2. P. 81–99. doi: 10.51501/jotnafe.v35i2.62
13. Nick C., Mark S., Martin S., Peter F. et al. Fire investigation: a primer for courts. 2023. P. 1-68. URL: <https://royalsociety.org/-/media/about-us/programmes/science-and-law/royal-society-fire-investigation.pdf>
14. Chmielewski R., Bąk A. Analysis of the safety of residential buildings under gas explosion loads. *Journal of Building Engineering.* 2021. Vol. 43. doi: 10.1016/j.job.2021.102815
15. Tomlin G. Gas explosions in dwellings, the effects of interconnected rooms and obstacles, and the interpretation of thermal damage. 2015. P. 1-480. URL: <https://etheses.whiterose.ac.uk/id/eprint/10599/>
16. Паспорт композитного газового балону. URL: <https://gazballon.com.ua/wp-content/uploads/2016/11/pasport.pdf>
17. Драганов Б. Х., Бессараб О. С., Долінський А. А., Лазоренко В. О., Міщенко А. В. *Теплотехніка.* Київ. 2005. С. 400. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/9bfb192a-a15b-4685-aa97-975ec8978dc3/content>
18. Рябова І. Б., Сайчук І. В., Шаршанов А. Я. *Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі.* Харків. 2002. С. 352. URL: http://www.univer.nu.czu.edu.ua/tmp_metod/467/Titul.pdf

Y. Klyuchka¹, DSc, Senior Researcher, Professor

D. Doroshenko², Specialist of the Department

¹National University of Urban Economy named by O.M. Beketov, Kharkiv, Ukraine

²National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

MATHEMATICAL MODEL OF HEATING OF PROPANE-BUTANE GAS CYLINDERS IN RESIDENTIAL BUILDINGS

This study investigates propane-butane gas cylinders and develops a mathematical model to predict the behavior of such systems under thermal influence. In the first stage, it was established that the share of heat required for gas heating ranges from 0.73 to 0.8, and the cylinder material can absorb from 20% to 100% of the heat, which significantly affects the heating dynamics. For cylinders with volumes of 12.7 and 26.2 liters, only at fill ratios of 0.24 and 0.36, respectively, does the amount of heat required for gas heating exceed the amount for cylinder heating. These results indicate a significant contribution of the cylinder material itself to heat absorption during cylinder heating. The second stage addresses the urgent safety problem of residential and industrial facilities caused by the widespread use of propane-butane, which is a highly flammable and explosive substance. Attention is paid to the risks associated with heating propane-butane cylinders, which can lead to increased pressure and depressurization, causing an explosion according to the BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) scenario. The

necessity of developing a mathematical model is substantiated, which would allow predicting the change in the temperature regime of cylinder components (walls, liquid, and gas) and the pressure of propane-butane within it in real-time under the influence of external factors, taking into account complex heat exchange processes. The developed model is based on the unsteady heat conduction equation for the cylinder body with third-kind boundary conditions on the outer and inner walls of the cylinder. The model construction considers the properties of the cylinder material (thermal conductivity, heat capacity, density, thermal expansion coefficient), its geometry (surface area, wall thickness, shape), etc. The obtained model will subsequently allow evaluating the temperature distribution in the cylinder wall, predicting critical values leading to failure and possible explosion.

Keywords: propane-butane, heating, unsteady heat conduction, explosion, cylinder, emergency

References

1. Doroshenko, D. O., Klyuchka, Y. P., Mykhaylyuk, O. P. (2020). Analiz naslidkiv vybukhiv ta umov utvorennia hazopovitryanykh sumishey u zhytlovykh budivlyakh. *Problemy pozhezhnoyi bezpeky*, 48, 37–44. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ppb_2020_48_8
2. DSTU IEC/ISO 31010:2013. (2013). Keruvannya ryzykom. Metody zahal'noho otsynuvannya ryzyku (IEC/ISO 31010:2009, IDT). Available at: <https://khoda.gov.ua/image/catalog/files/dstu%2031010.pdf>
3. Analitychna dovidka pro pozhezhi ta yikh naslidky v Ukraini za 12 misyatsiv 2024 roku. Kyiv, 39. Available at: <https://dsns.gov.ua/upload/2/3/0/1/6/1/2/analitichna-dovidka-pro-pozezi-za-12-misiaciv-2024-na-sait.pdf>
4. Analitychna dovidka pro pozhezhi ta yikh naslidky v Ukraini za 12 misyatsiv 2023 roku. Available at: <https://dsns.gov.ua/upload/2/0/2/2/3/2/1/2023-rik.pdf>
5. Klyuchka, Y. P., Doroshenko, D. O. (2025). Eksperymental'na otsinka tysku propan-butanu v baloni pry yoho nahrivanni. *Stalyy rozvytok mist: postvoyennyi period: Materialy Vseukrayins'koyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi*. Kharkiv: KHNUMH im. O. M. Beketova, 237–239. Available at: https://science.kname.edu.ua/images/dok/konferentsii/stalyirozvytok2019/2025/C_3_Budivelna_ta_civilna_inzeneria_25.pdf
6. Huseynov, R. N., Panchuk, Y. V. (2021). Osnovni rozrakhunkovi metody doslidzhennya obstavyn i mekhanizmu tekhnohennykh vybukhiv. *Teoriya ta praktyka sudovoyi ekspertyzy i kryminalistyky*, 23, 258–269. doi: 10.32353/khrife.1.2021.20
7. Chengjun, Y., Li, C., Li, Zh., Feng, B., Xu., R. (2025). Research on the hazards of gas leakage and explosion in a full-scale residential building. *Defence Technology*, 43, 168–181. doi: 10.2139/ssrn.4770361
8. Turgut, P., Gurel, M., Pekgokgoz, R. (2013). LPG explosion damage of a reinforced concrete building: A case study in Sanliurfa, Turkey. *Engineering Failure Analysis*, 32, 220–235. doi: 10.1016/j.engfailanal.2013.04.004
9. Krzysiak, Z., Samociuk, W., Bartnik, G., Plizga, K., Dziki, D., Kaliniewicz, Z., Nieoczym, A., Wyciskiewicz, A., Otto, T. (2017). Analysis of tank safety with propane-butane on LPG distribution station. *Pol. J. Chem. Technol*, 19, 99–102. doi: 10.1515/pjct-2017-0074
10. Baobin, G., Wenjie, Z., Chuangnan, R., Shaopeng, S., Chenhui, G. (2023). Study of the effect of gas baffles on the prevention and control of gas leakage and explosion hazards in utility tunnel. *Applied Sciences*, 13, 7, 1–19. doi: 10.3390/app13074264
11. Ismail, M., Sharif, K., Udin, Z., Hassan, M., Nawi, M., Hamid, Z., Ibrahim, J., Othman, A. (2018). A risk assessment in natural gas supply. *International Journal of Fire Safety*. DOI: 10.52363/2524-0226-2025-41-13

Supply Chain Management, 7, 4, 180–184. doi.org/10.59160/ijscm.v7i4.2371

12. Tindal, J. (2018). Forensic engineering analysis of an explosion allegedly caused by an overfilled propane cylinder. *Journal of the NAFE*, 35, 2, 81–99. doi:10.51501/jotnafe.v35i2.62

13. Nick, C., Mark, S., Martin, S., Peter, F., et al. (2023). Fire investigation: a primer for courts, 1–68. Available at: <https://royalsociety.org/-/media/about-us/programmes/science-and-law/royal-society-fire-investigation.pdf>

14. Chmielewski, R., Bąk, A. (2021). Analysis of the safety of residential buildings under gas explosion loads. *Journal of Building Engineering*, 43. doi:10.1016/j.jobbe.2021.102815

15. Tomlin, G. (2015). Gas explosions in dwellings, the effects of interconnected rooms and obstacles, and the interpretation of thermal damage, 1–480. Available at: <https://etheses.whiterose.ac.uk/id/eprint/10599/>

16. Pasport kompozitnogo gazovogo balonu. Available at: <https://gazballon.com.ua/wp-content/uploads/2016/11/pasport.pdf>

17. Drahanov, B .K., Bessarab, O. S., Dolins'kyi, A. A., Lazorenko, V. O., Mishchenko, A. B. (2005). *Teplotekhnika*. Kyiv, 400. Available at: <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/9bfb192a-a15b-4685-aa97-975ec8978dc3/content>

18. Ryabova, I. B., Saychuk, I. V., Sharshanov, A. Y. (2002). *Termodynamika i teploperedacha u pozhezhnii spravi*. Kharkiv, 352. Available at: http://www.univer.nuczu.edu.ua/tmp_metod/467/Titul.pdf

Надійшла до редколегії: 23.02.2025

Прийнята до друку: 22.04.2025