

*М.М. Семерак¹, д-р техн. наук, професор,
О.І. Балицький², д-р техн. наук, професор, А.В. Субота¹*
(¹ Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України)

НАГРІВАННЯ БАЛОНІВ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ ГАЗУ ЗА УМОВ ПОЖЕЖІ

Визначено та досліджено теплові потоки, зумовлені випромінюванням факела пожежі, що падають на стінки балона. Досліджено нестационарне температурне поле по товщині стінки балона залежно від величини теплового потоку, товщини стінки, їх теплофізичних характеристик. Досліджено процес зміни тиску всередині балона з урахуванням нестационарного температурного поля стінки балона.

Ключові слова: пожежа, тепловий потік, нестационарне температурне поле, тиск.

Актуальність теми. В промисловості широко застосовуються апарати, посудини і комунікації, які працюють під тиском, тобто є герметичними (балони, газгольдери та ін.). Аварії герметичних систем небажані не тільки з технічної точки зору, а й для обслуговуючого персоналу і виробництва в цілому [1-3].

Балони – це закриті металеві посудини різних ємностей, що працюють під тиском. Граничний тиск у балоні приймається для стиснених газів при температурі $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, а для зріджених – $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$. При пожежі температура полум'я сягає $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ і більше. Збільшення температури газу всього на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ збільшує тиск у балоні на $0,5\text{ атм.}$, що може призвести до вибуху. На сьогодні в науковій літературі відсутні аналітичні дослідження впливу високих температур пожежі на напружено-деформований стан балонів з газом. В наявних дослідженнях не враховується градієнт температури по товщині стінки балона. В роботі [3] автори використовують імітаційні моделі, які не враховують реальних факторів процесу нагріву. Тому аналітичні дослідження впливу величини теплового потоку від полум'я пожежі на час досягнення критичної температури в балоні зі стисненим газом є актуальними.

Постановка задачі. Тривале зберігання газів під високим тиском в технологічних процесах здійснюється у балонах та газгольдерах. Розглянемо водневі 40-літрові балони (довжина балона $1340\dots 1390\text{ мм}$, діаметр балона – 219 мм , товщина стінки – 10 мм , маса балона – $60\dots 81\text{ кг}$), які містять 6 м^3 газу під тиском до 15 МПа . Якщо балон з газом знаходиться в зоні дії пожежі – він буде нагріватися. При його нагріванні значно зросте тиск газу в ньому. Збільшення тиску і температури призводить до зростання силових та температурних напружень. Необхідно визначити величини теплових потоків, зумовлених температурою полум'я, його розмірами та віддаллю до балона. Для знаходження величини нагріву балона тепловим потоком, необхідно знайти розв'язок нестационарного рівняння теплопровідності з граничними умовами другого роду. При відомій температурі балона необхідно визначити зміну тиску газу.

Дослідження розподілу нестационарного температурного поля по товщині стінки балона При дослідженні розподілу температури по товщині стінки балона, зумовленого тепловим потоком пожежі, змодельємо його пустотілим циліндром з товщиною $R_2 - R_1$, температура якого дорівнює T_0 (рис. 1). З моменту виникнення пожежі, який приймемо за початок відліку $\tau = 0$, конструкція балона з усіх боків нагрівається тепловим потоком q . Необхідно знайти величину і розподіл температури по товщині стінки балона в будь-який момент часу.

Початок циліндричної системи координат помістимо по осі циліндра. Вісь r лежить в площині поперечного перерізу стінки балона і перпендикулярна до осі циліндра.

Умову задачі математично можемо сформулювати таким чином. Маємо диференціальне рівняння теплопровідності [4, 5]:

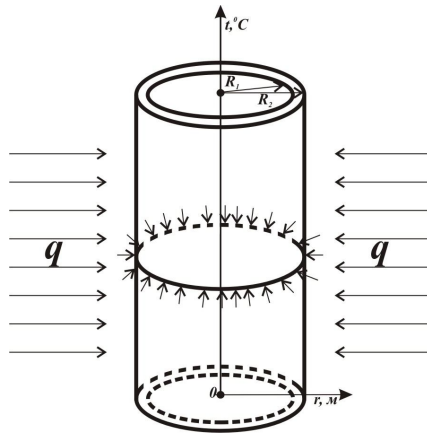


Рис. 1. Схематичне зображення балона та дії на нього теплового потоку пожежі

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right), \quad (\tau > 0; 0 < r < R), \quad (1)$$

і крайові умови:

$$\begin{aligned} T(r, 0) &= T_0 = const, \\ -\lambda \frac{\partial t(R_1, \tau)}{\partial r} &= 0, \quad -\lambda \frac{\partial t(R_2, \tau)}{\partial r} + q_c = 0, \quad q_c = const, \end{aligned} \quad (2)$$

де $T(x, \tau)$ – нестационарна температура в поперечному перерізі стінки балона, K ; R_1, R_2 – внутрішній і зовнішній радіуси балона; $a = \frac{\lambda}{c_v \cdot \rho}$ – коефіцієнт температуропровідності, m^2 / c ; λ – коефіцієнт теплопровідності, $\frac{Вт}{м \cdot K}$; c_v – питома ізохорна теплоємність, $\frac{Дж}{кг \cdot K}$; ρ – густина матеріалу, з якого виготовлений балон, $\frac{кг}{м^3}$; q – тепловий потік від полум'я пожежі, який поглинається стінкою балона, $\frac{Вт}{м^2}$, τ – час, c .

Застосувавши кінцеве інтегральне перетворення Ганкеля, знаходимо рішення задачі у такому вигляді:

$$T(r, \tau) - T_0 = \frac{q}{\lambda} \cdot R_2 \left[\frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \left(2 \cdot Fo - \frac{1}{4} \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{r^2}{R_2^2} \right) - \frac{R_1^2}{R_2^2} \cdot \left(\ln \frac{r}{R_1} + \frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \ln \frac{R_1}{R_2} + \frac{3}{4} \right) \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi}{\mu_n} \cdot \frac{J_1\left(\mu_n \cdot \frac{R_1}{R_2}\right) J_1(\mu_n)}{J_1^2\left(\mu_n \cdot \frac{R_1}{R_2}\right) - J_1^2(\mu_n)} \cdot \left[J_0\left(\mu_n \cdot \frac{r}{R_2}\right) \cdot Y_1\left(\mu_n \cdot \frac{R_1}{R_2}\right) - Y_0\left(\mu_n \cdot \frac{r}{R_2}\right) \cdot J_1\left(\mu_n \cdot \frac{R_1}{R_2}\right) \right] \cdot e^{(-\mu_n^2 \cdot Fo)} \right], \quad (3)$$

де $J_0(\mu_n)$, $Y_0(\mu_n)$ – функція Бесселя першого і другого роду відповідно; $Fo = \frac{a\tau}{\delta^2}$ – критерій Фур'є;

μ_n – корені характеристичного рівняння $J_1\left(\mu_n \cdot \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot Y_1(\mu_n) = Y_1\left(\mu_n \cdot \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot J_1(\mu_n)$.

Для знаходження температурного поля (3) необхідно визначити величину теплового потоку від факела полум'я пожежі q .

При дослідженні теплообміну випромінювання між факелом полум'я і конструкцією балона необхідно визначити частину енергії, яка поглинається стінками балона. Тепловий потік визначимо за формулою [6].

$$q = 5,67 \cdot \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right] \cdot \varepsilon_{1-2} \cdot \varphi_{2-1}, \quad (4)$$

де $\varepsilon_{1-2} = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}$ – приведений ступінь чорноти системи полум'я-конструкція; ε_1 – ступінь чорноти поверхні стінок балона; ε_2 – ступінь чорноти факела полум'я; φ_{2-1} – кутовий коефіцієнт випромінювання; T_1 – температура поверхні стінок балона, K; T_2 – температура факела, K.

Кутовий коефіцієнт випромінювання дорівнює [6]:

$$\varphi_{2-1} = \frac{R_2}{R'}, \quad (5)$$

де R_2 – радіус балона, м, R' – віддаль між балоном та фронтом пожежі, м.

За формулами (4) і (5) проведемо розрахунки величини кутового коефіцієнта випромінювання φ_{2-1} та теплового потоку q в залежності від відстані R' і величини температур T_1 і T_2 . Розрахунки проведені для горіння турбінної оливи з такими вихідними даними: $R_2 = 0,1095$ м, $\varepsilon_1 = 0,9$, ступінь чорноти полум'я горіння турбінної оливи – $\varepsilon_2 = 0,8$. Графічне зображення результатів розрахунків представлено на рис. 2 і 3 відповідно

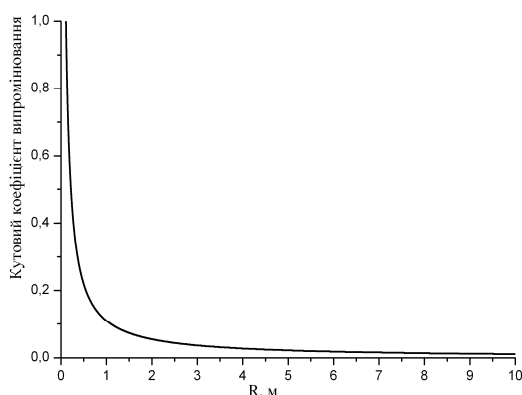


Рис. 2. Залежність величини кутового коефіцієнта випромінювання φ_{2-1} від віддалі між фронтом полум'я та конструкцією балона

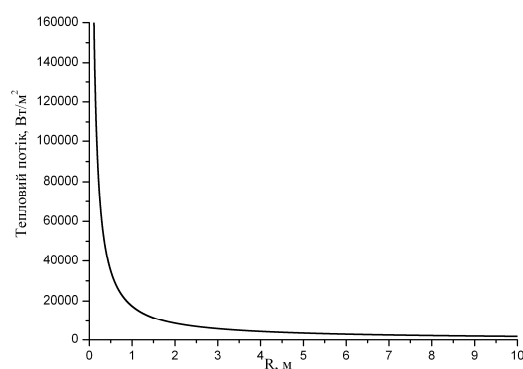


Рис. 3. Залежність величини теплового потоку від віддалі між фронтом полум'я та конструкцією балона за умов горіння оливи (температура полум'я – 1400 K)

Як видно з рис. 3, із збільшенням відстані між фронтом полум'я та балоном тепловий потік різко зменшується. Знаючи величину теплових потоків, які падають на поверхню балона, можемо визначити і дослідити нестационарне температурне поле в його стінці.

За формулою (3) проведемо дослідження зміни температурного поля на внутрішній поверхні балона при заданому тепловому потоці. При розрахунках враховуємо реальну товщину стінки конструкції балона, яка дорівнює $R_2 - R_1 = 10$ мм. Початкова температура ста-

новить $T_0 = 300\text{K}$. Дослідження проводились для температури полум'я факела $T_2 = 1400\text{K}$ (горіння турбінної оливи). Результати розрахунків зобразимо на *рис. 4*.

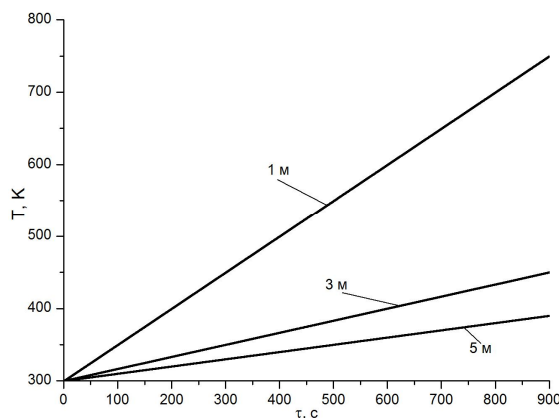


Рис. 4. Зміна температури на внутрішній поверхні балона за різних відстаней між балоном і фронтом полум'я

Аналіз графічних залежностей показує, що на величину температури та інтенсивність нагрівання впливає віддаль між балоном та полум'ям.

Знаючи закон зміни температури на внутрішній поверхні балона дослідимо зміну тиску всередині балона.

Зміну тиску всередині балона, знаходимо з рівняння Ван-дер-Ваальса:

$$P(\tau) = \frac{\nu \cdot R \cdot T(\tau)}{V - \nu \cdot b} - \frac{\nu^2 \cdot a}{V^2}, \quad (6)$$

де $P(\tau)$ – тиск газу в балоні, Па; V – об'єм балона, м^3 ; $R = 8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$ – універсальна газова стала; $T(\tau)$ – зміна температури водню в балоні, К; ν – кількість речовини, моль; a – міра притягання між частинками; b – мінімальний об'єм, який може займати 1 моль газу при стисканні.

За формулою (6) проведемо дослідження зміни тиску в балоні упродовж 30 хв. Результати досліджень зобразимо графічно на *рис. 5*. При цьому для водню $a = 0,02476$, $b = 2,66 \cdot 10^{-5}$.

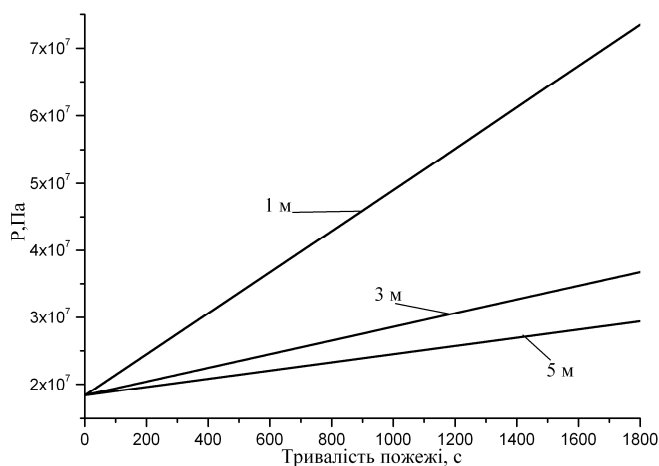


Рис. 5. Зміна тиску всередині балона залежно від тривалості пожежі при різних відстанях між балоном і фронтом полум'я

Аналіз графічної залежності (рис. 5) показує, що за час 30 хв тиск в балоні збільшується на 75 МПа при відстані між балоном та фронтом полум'ям 1 м.

Висновок. В роботі одержані аналітичні залежності для дослідження температури в конструкції балона за умов пожежі. Використовуючи рівняння Ван-дер-Ваальса для водню, знайдено залежність тиску в балоні при зміні температури. Отримані результати дають можливість визначити механічні та температурні напруження в конструкції балонів та визначити час настання граничної межі міцності балона.

Список літератури:

1. Ажажа В.М. Материалы для хранения водорода. Анализ тенденций развития на основе данных об информационных потоках / В.М. Ажажа, М.А. Тихоновский, А.Г. Шепелев // Вопросы атомной науки и техники. – 2006. – №1. – С. 23-27.

2. Рубан А.Г. Анализ характеристик баллонов высокого давления для сжатых газов / А.Г. Рубан // Технические газы. – 2009. – №2. – С. 48-55.

3. ГОСТ 14249-89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. – Введен взамен ГОСТ 14249-80: введен 01.01.1990. – М.: Министерство химического и нефтяного машиностроения, 1990. – 55 с.

4. Ключка Ю.П. Иммитационная модель времени нагрева баллона с водородом до момента его разрушения / Ю.П. Ключка, В.И. Кривцова, В.Г. Борисенко // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: НУТЗУ, 2010. – №28. – С. 93-100.

5. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.

6. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 487 с.

7. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением. – М.: Энергоатомиздат. – 1991. – 432 с.

М.М. Семерак, А.И. Балицкий, А.В. Субота

НАГРЕВ БАЛЛОНОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ГАЗА В УСЛОВИЯХ ПОЖАРА

Определено и исследовано тепловые потоки, обусловленные излучением факела пожара, падающие на стенки баллона. Исследовано нестационарное температурное поле по толщине стенки баллона в зависимости от величины теплового потока, толщины стенки, а также их теплофизических характеристик. Исследован процесс изменения давления в корпусе баллона с учетом нестационарного температурного поля стенки баллона.

Ключевые слова: пожар, тепловой поток, нестационарное температурное поле, давление.

М. М. Semerak, O. I. Balytskyi, A. V. Subota

CYLINDER HEATING FOR GAS STORING UNDER FIRE CONDITIONS

The thermal current, caused by fire flame irradiation on cylinder wall, was determined and studied. The unsteady temperature field on cylinder wall thickness depending on heat flux magnitude, wall thickness as well as its thermal and physical characteristics was investigated. The process of pressure change inside cylinder taking into account the unsteady temperature field of cylinder wall was studied.

Keywords: fire, thermal current, unsteady temperature field, pressure.

