

ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ВЕРТИКАЛЬНИХ СТАЛЕВИХ РЕЗЕРВУАРІВ ПРИ ГОРІННІ НАФТОПРОДУКТІВ

Басманов О. Є., д.т.н., професор,

Карпова Д. І.

Національний університет цивільного захисту України

Вертикальні сталеві резервуари широко застосовуються для зберігання нафти та легкозаймистих рідин. У разі виникнення пожежі відбувається інтенсивний тепловий вплив на стінки резервуара, що може призвести до втрати міцності сталі, деформації листів і руйнування зварних швів. За температур 500–600 °С несуча здатність металу суттєво знижується, що створює передумови для прогресуючого руйнування конструкції та ускладнює процес гасіння.

Метою дослідження є розроблення математичної моделі, яка дозволяє визначити розподіл температури по стінці резервуара з нафтопродуктом, що горить, з урахуванням взаємодії процесів теплопровідності, випромінювання та конвекції [1].

Поширення тепла в стінці описується рівнянням теплопровідності. Враховуючи, що товщина стінки значно менша за висоту та діаметр резервуара, тривимірну задачу зведено до двовимірної. Рівняння теплового балансу має вигляд:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_s \left(\frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q}{c_s \rho_s \delta_s}, \quad t > 0, \quad 0 < z < H, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi, \quad (1)$$

де R – радіус резервуара; q – щільність теплового потоку, що отримує стінка внаслідок променевого і конвекційного теплообміну з полум'ям, рідиною, пароповітряною сумішшю і навколишнім середовищем; δ_s – товщина стінки; H – висота резервуара.

Для ділянок стінки вище рівня рідини враховано променевий теплообмін із полум'ям, поверхнею рідини, навколишнім середовищем та іншими ділянками стінки, а також конвекційний теплообмін із повітрям і парами нафтопродукту. Нижня частина стінки додатково охолоджується рідиною, що зберігається в резервуарі. Променевий теплообмін визначається за законом Стефана–Больцмана.

Інтенсивність вигорання нафтопродукту прийнята пропорційною тепловому потоку, який надходить до поверхні рідини. Зменшення рівня рідини призводить до зниження коефіцієнта взаємного опромінення між полум'ям і дзеркалом рідини, а отже – до зменшення питомої масової швидкості вигорання. Динаміка зміни рівня описується рівнянням:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\eta}{\rho_\ell}, \quad (2)$$

де η – питома масова швидкість вигорання; ρ_ℓ – густина рідини.

Чисельне розв'язання системи рівнянь виконано методом скінчених різниць. Розрахунки проведено для резервуара типу РВС-5000, заповненого бензином до половини висоти. Отримано просторово-часовий розподіл температури по стінці.

Результати свідчать, що найбільш інтенсивне нагрівання відбувається у верхній частині стінки. За 15 хвилин після початку пожежі температура верхнього краю може досягати близько 800 °С. За наявності вітру спостерігається деформація полум'я та його

зміщення за межі резервуара, що зумовлює додаткове нагрівання підвітряної сторони. У цьому випадку температура може перевищувати 950 °С. Нижня частина стінки нагрівається значно менше завдяки теплообміну з рідиною.

Показано також (рис. 1), що зі зменшенням рівня нафтопродукту скорочується довжина полум'я. Розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними не перевищує 9 %, що підтверджує достовірність запропонованої моделі.

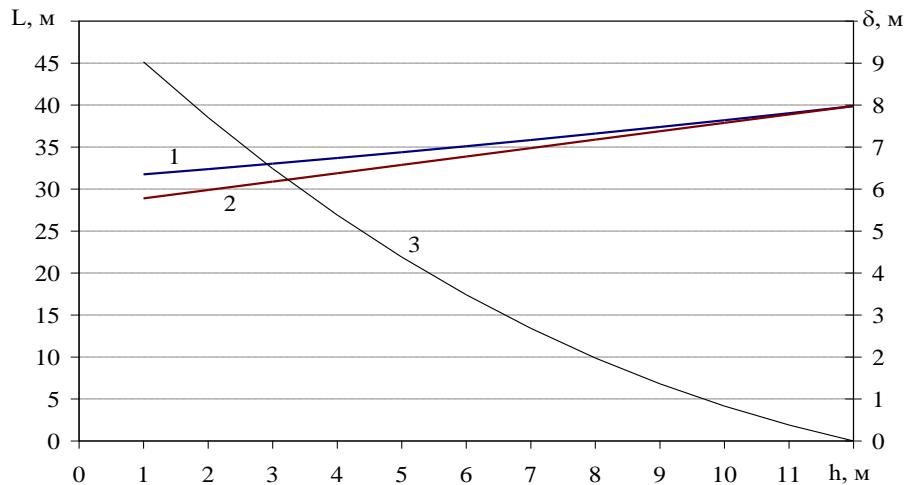


Рисунок 1 – Залежність довжини полум'я над резервуаром від рівня нафтопродукту в резервуарі РВС-5000: 1 – розрахунок; 2 – емпіричні дослідження; 3 – відносне відхилення (по правій осі)

Отже, у результаті проведеного дослідження розроблено математичну модель теплового стану вертикального сталевого резервуара з нафтопродуктом, що горить, яка ґрунтується на розв'язанні двовимірного рівняння теплопровідності для стінки з урахуванням променевого та конвекційного теплообміну з полум'ям, поверхнею рідини, газовим простором і навколишнім середовищем. Встановлено, що максимальні температури формуються у верхній частині стінки резервуара, причому за наявності вітрового впливу найбільш небезпечним є підвітряний бік, де внаслідок деформації полум'я та його виходу за межі резервуара температура може перевищувати критичні значення втрати міцності сталі. Показано, що зниження рівня нафтопродукту призводить до зменшення коефіцієнта взаємного опромінення між поверхнею рідини та полум'ям, що обумовлює зменшення питомої масової швидкості вигорання та скорочення довжини полум'я; при цьому розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними не перевищує 9 %, що підтверджує адекватність запропонованого підходу. Отримані результати можуть бути використані для прогнозування термічної стійкості резервуарів, оцінювання ризику прогресуючого руйнування конструкцій та обґрунтування інженерних рішень щодо підвищення ефективності протипожежного захисту резервуарних парків.

ЛІТЕРАТУРА

1. Басманов О. Є., Карпова Д. І., Бенедюк В. С., Зазимко О. В., Володченко М. А. Побудова моделі нагріву стінки резервуара з нафтопродуктом, що горить. *Problems of Emergency Situations*. 2025. № 2(42). С. 4–25. DOI: 10.52363/2524-0226-2025-42-1