

Абрамов Ю.О., д.т.н., професор,
 Басманов О.Є., д.т.н., професор,
 Саламов Д.О.

ОЦІНКА ПЛОЩІ РОЗЛИВУ ГОРЮЧОЇ РІДИНИ В ОБВАЛУВАННІ РЕЗЕРВУАРА

Розлив горючої рідини в обвалуванні резервуара є однією з небезпечних надзвичайних ситуацій, що можуть виникнути в процесі експлуатації резервуара з сировою нафтою або нафтопродуктом. Спалахування парів горючої рідини здатне призвести не лише до пожежі в обвалуванні, а і до її каскадного розповсюдження на резервуар та сусідні з ним резервуари. Для оцінки можливого теплового впливу пожежі на споруди резервуарного парку необхідно побудувати моделі динаміки розтікання рідини і оцінки максимальної площі розливу.

В роботі [1] розглянуто гравітаційне розтіканні рідини на горизонтальній поверхні і отримано оцінку граничної товщини δ шару рідини у вигляді

$$\delta = \sqrt{\frac{2\sigma}{\rho g}}, \quad (1)$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу рідини, $H/м$; ρ – густина рідини; g – прискорення вільного падіння. Залежність (1) отримано у припущенні, що розтікання рідини припиняється, коли сила поверхневого натягу стає рівною гравітаційній силі, що примушує рідину розтікатися.

В [2] враховано змочування поверхні рідиною, що розтікається, а саме – кут змочування θ (рис. 1):

$$\delta = \sqrt{\frac{2\sigma}{\rho g}(1 - \cos \theta)}. \quad (2)$$

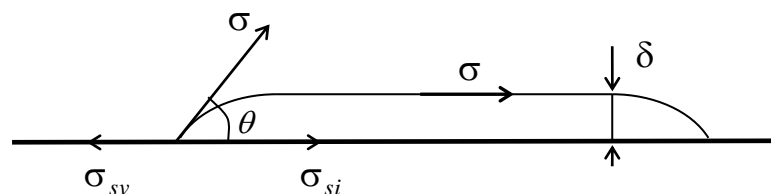


Рис. 1. Рівноважний стан шару рідини на горизонтальній поверхні

Формулу (2) отримано з рівняння балансу між фазних напружень:

$$\sigma_{sv} + P - \sigma - \sigma_{si} = 0, \quad (3)$$

де σ_{sv} – вільна поверхнева енергія, Дж/м²; σ_{sl} – міжфазна енергія між твердою поверхнею і рідиною; P – гравітаційна потенційна енергія:

$$P = \int_0^{\delta} p(z) dz = \frac{1}{2} \rho g \delta^2. \quad (4)$$

Відповідно до закону Янга,

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{sv} - \sigma_{sl}}{\sigma}. \quad (5)$$

Із формул (3) і (5) випливає, що внаслідок існування міжфазних напружень, коефіцієнт поверхневого натягу, що розглядається в [1], має бути скорегований за допомогою множника $(1 - \cos \theta)$. Це стосується, зокрема, і моделі динаміки розтікання рідини на горизонтальній поверхні [1]:

$$R'' = \frac{gV(t)}{\pi R^3} - 0,455 \left(\lg \frac{2R|R'|}{\nu} \right)^{-2,58} \frac{2|R'|R'}{V(t)} \pi R^2 - \frac{\sqrt{2}\pi c_d c_1^3 R'|R'R^2}{V(t)} - \frac{2\pi R \sigma (1 - \cos \theta)}{\rho V(t)}, \quad (6)$$

де $R(t)$ – діаметр розливу; $V(t)$ – об'єм розлитої рідини; ν – кінематична в'язкість рідини; $c_1 = 0,25$, $c_d = 0,09$ – емпіричні сталі.

Відзначимо, що для води кут змочування θ складає близько 85°. Тоді

$$(1 - \cos \theta) \approx 0,91;$$

$$\sqrt{1 - \cos \theta} \approx 0,96.$$

Це означає, що товщина шару води, розрахована за формулами (1) і (2), буде відрізнятися на 4%. В той же час, зі збільшенням значення $|\cos \theta|$ буде збільшуватися різниця між формулами (1) і (2). Наприклад, для бензину ($\theta = 19,7^\circ$): $\sqrt{1 - \cos \theta} \approx 0,24$, тобто товщина шару бензину розрахована по формулі (2), буде в 3 рази меншою порівняно з товщиною, розрахованою за формулою (1).

В [3] описано експеримент по розтіканню рідини на горизонтальній негладкій поверхні (на прикладі розтікання води на сухому ґрунті). Особливістю розтікання рідини на негладкій поверхні є те, що вона має заповнювати нерівності поверхні, внаслідок чого середня товщина шару рідини збільшується, а радіус розливу зменшується. Максимальне значення радіуса R_{max} визначається із співвідношення

$$V = \pi R_{max}^2 \delta_a + \pi R_{max}^2 \delta, \quad (7)$$

де δ_a – середня глибина нерівностей поверхні. Об'єднуючи (2) і (7), отримуємо [4]

$$R_{max} = \sqrt{\frac{V}{\pi(\delta_a + \delta)}} = \sqrt{\frac{V}{\pi\left(\delta_a + \sqrt{\frac{2\sigma}{\rho g}}(1 - \cos\theta)\right)}}. \quad (8)$$

Внаслідок того, що середня глибина нерівностей майже на порядок більша, ніж товщина плівки горючої рідини на гладкій поверхні, вплив множника $(1 - \cos\theta)$, буде менш істотним у порівнянні з розтіканням на гладкій поверхні. Наприклад, для бензину ігнорування множника $(1 - \cos\theta)$ призводить до похибки близько 3,4%. Це означає, що процес розтікання рідини визначається в першу чергу характером нерівностей ґрунту, а не характером змочуваності поверхні рідиною.

Отже, принцип гравітаційного розтікання шару рідини на горизонтальній твердій поверхні може бути покладений в основу побудови математичної моделі при її розтіканні у вигляді залежності радіусу розливу від об'єму рідини і часу. Врахування кута змочування θ дозволяє уточнити моделі розтікання рідини на гладкій поверхні. При цьому зменшення кута змочування призводить до зменшення товщини шару рідини на поверхні. В той же час для негладких поверхонь (наприклад, для випадку розтікання рідини на ґрунті), визначаючу роль відіграють саме нерівності поверхні, а не характер її змочуваності.

Цитована література

1. Горпинич И.А. Моделирование динамики разлива горючей жидкости на горизонтальной поверхности [Текст] / И.А. Горпинич // Пожарная безопасность. – Харьков: НУГЗУ, 2012. Вып. 32. С. 50-56.
2. Vignes-Adler M. Physico-Chemical Aspects of Forced Wetting [Text] / M. Vignes-Adler // Drop-Surface Interactions. – Wien: Springer, 2002. P. 103-157.
3. Басманов А.Е. Растекание жидкости на негладкой горизонтальной поверхности при аварии на железнодорожном транспорте [Текст] / А.Е. Басманов, И.А. Горпинич // Проблемы надзвичайних ситуацій – Харків: НУЦЗУ, 2014. Вип. 20. С. 16-20. Режим доступу: http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/248/1/Pns_2014_20_5.pdf.
4. Саламов Д.О. Аналіз моделей розтікання рідини на горизонтальній поверхні в умовах надзвичайної ситуації / Д.О. Саламов, Ю.О. Абрамов, О.Є. Басманов // Проблемы надзвичайних ситуацій. Харків: НУЦЗУ. 2017. Вип. 27. С. 104-110. Режим доступу: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/6896>.