

9. Шналь Т.Н. Свойства и оптимизация составов вспучивающихся покрытий для огнезащиты металлических конструкций: 05.23.05: Дис...канд. техн.наук. –Львов, ГУ «Львовская политехника», 1995. –248 с.

10. Рекомендации по защите бетонных и железобетонных конструкций от хрупкого разрушения при пожаре. –М.: Стройиздат, 1979. – 22 с.

УДК 539.3:517.958

*М.Ф.Ясінський, к.т.н., доцент, А.Д.Кузик, к.ф.-м.н., В.М. Юзевич, д.ф.-м.н., професор (Львівський інститут пожежної безпеки МНС України), Л.М.Ясінська (Українська академія друкарства), В.В.Ковалишин, О.В.Ковалишин (Львівський інститут пожежної безпеки МНС України)*

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПОДАЧІ ПІНИ

Розроблено математичну модель фізико-механічних процесів в швидко рухомій суміші двох фаз (рідкої і газоподібної) з урахуванням зовнішнього розмірного ефекту на основі методики опису поверхневих явищ

В період бурхливого розвитку пожежної техніки все більшу увагу привертають фізичні процеси на границі розділу середовищ. Але провести експеримент і безпосередньо оцінити взаємодію частинок рідини із стінками патрубків у міжфазних шарах досить важко. Тому спочатку необхідно побудувати не особливо громіздку в математичному плані математичну модель і провести обчислювальний експеримент для аналізу параметрів перехідного шару, а вже потім підбирати такі експерименти, які могли б дати непряму, але досить важливу інформацію про те, що діється на границі.

Розглядається швидкоплинна суміш рідини і газу в робочій частині патрубка. Проявляється зовнішній розмірний ефект, зумовлений зміною геометричних розмірів патрубка.

Мета першої частини даної праці – математичне моделювання фізико-механічних процесів в швидкоплинній суміші двох фаз (рідкої і газоподібної) з урахуванням зовнішнього розмірного ефекту на основі методики опису поверхневих явищ.

Суміш в першому наближенні вважаємо 3-компонентною:  $k = 3$  – рідина,

$k = 2$  – бульбашки газу,  $k = 1$  – розчинений в рідині газ. Вважаємо суміш стискуваною, а газ, що заповнює бульбашки, досконалим, тобто хімічні реакції в них (бульбашках) відсутні, вільних електричних зарядів немає, а в'язкістю суміші нехтуємо.

Основними процесами в суміші вважаємо теплові, деформаційні (рух суміші з великою швидкістю  $V$ ), а також виникнення (зникнення), перерозподіл в потоці газових бульбашок.

З метою опису зовнішнього розмірного ефекту тонкий приграничний шар, що обмежує суміш, моделюємо фізичною поверхнею з наданими їй властивостями приповерхневого шару.

При макроскопічному представленні процесів відповідно до відомих положень механіки суцільного середовища [1] і термодинаміки нерівноважних процесів [2] використовувалась гіпотеза локальної рівноваги в кожному малому елементі об'єму і поверхні.

Введемо параметри термодинамічного стану [3]:  $T$  – температура;  $S$  – ентропія;  $\varepsilon_{ij}$ ,  $\sigma_{ij}$  – компоненти тензорів деформацій і напружень;  $C_k$ ,  $M_k$  – концентрація та хімічний потенціал.

Для внутрішньої енергії  $U$  (в розрахунку на одиницю маси речовини) і заданих параметрів стану використаємо такі зображення [3]:

$$R(f) = R^+ \cdot \theta^+(f) + R^s \cdot \delta^s(f), \quad (1)$$

де  $R(f) = (U, \varepsilon_{ij}, \sigma_{ij}, T, S, C_k, M_k)$ ;  $\theta^+(f) = 0$  при умові  $f = 0$ ;

$$\theta^+ = \theta^+(f) = \begin{cases} 0, & \text{при умові } f < 0, \\ 1, & \text{при умові } f > 0; \end{cases}$$

$\delta^s(f) = \delta(f) \cdot |\text{grad } f|$ ;  $\delta(f)$  – функція Дірака;

$f(x, y, z, \tau) = 0$  – рівняння поверхні розділу контактуючих тіл;

$f(x, y, z, \tau) > 0$  – відповідає двофазній суміші;

$x, y, z$  – декартові координати;  $\tau$  – час; індекс “+” відповідає суміші в середині труби; індекс “s” відповідає суміші в тонкому поверхневому шарі поблизу стінок труби (цей поверхневий шар моделюємо фізичною поверхнею аналогічно як у праці [3]).

Підставивши приведені параметри термодинамічного стану в балансові співвідношення для маси компонент, імпульса, ентропії [1] і враховуючи незалежність узагальнених спеціальних функцій  $\theta^+$  і  $\delta^s$ , отримаємо диференціальні рівняння моделі для опису процесу проходження багатокомпонентної рідини по трубі, з урахуванням впливу стінок:

$$\rho^s \cdot dc_k^s / d\tau + J_{kN}^+ + \nabla_s \cdot \bar{J}_k^s = v_k^s \cdot \zeta^s,$$

$$\rho^s \cdot dV^s / d\tau = \nabla_s \cdot p^s + p^+ \bar{N},$$

$$\rho^s \cdot dS^s / d\tau + J_{sN}^+ + \nabla_s \cdot \bar{J}_s^s = \sigma_s^s,$$

$$\rho^s \cdot dU^s / d\tau = p^s de^s / d\tau - \nabla_s \cdot \bar{J}_T^s + \nabla_s (M_1^s \bar{J}_1^s + M_2^s \bar{J}_2^s) - M_1^+ \bar{J}_{1N}^+ - M_2^+ \bar{J}_{2N}^+ - \rho^+ (U^+ - U^s - (\bar{V}^+ - \bar{V}^s)^2 / 2) (V_N^+ - V_N^s) - J_{TN}^+ - A^s \zeta^s - p^+ (V_N^+ - V_N^s).$$

Тут  $\rho^s = \rho_1^s + \rho_2^s + \rho_3^s$  – питома густина поверхневої фази;  $c_k^s = \rho_k^s / \rho^s$  – зміна концентрації компонент суміші для фізичної поверхні ( $c_k = C_k - C_{k0}$ );  $k = 1, 2, 3$ ;  $M_k^s$  – хімічні потенціали компонент у поверхневій фазі;  $p^s$ ,  $e^s$  – тиск і деформація суміші відповідно ( $e = (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) / 3$ ,  $\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = \varepsilon_{33}$ ;  $p = (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) / 3$ ,  $\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{33}$ ); потоки маси  $\bar{J}_k^+ = \rho_k^+ (\bar{V}_k^+ - \bar{V}^+)$ ,  $\bar{J}_k^s = \rho_k^s (\bar{V}_k^+ - \bar{V}^s)$ ; потоки теплоти  $\bar{J}_T^+$ ,  $\bar{J}_T^s$ ; потоки ентропії  $\bar{J}_s^+$ ,  $\bar{J}_s^s$ ,  $\bar{J}_s = \bar{J}_T / T$ ; швидкість  $\zeta^s$  і спорідненість  $A^s = M_1^s - M_2^s$  процесу утворення бульбашок; постійні  $v_1 = 1$ ,  $v_2 = -1$  пропорційні стехіометричним коефіцієнтам процесу утворення (зникнення) бульбашок газу;  $\sigma_s^s$  – виробництво ентропії;  $U$  – питома внутрішня енергія; нормаль до фізичної поверхні  $\bar{N}$ ;  $\nabla_s$  – поверхневий двовимірний градієнт;  $V^s$  – швидкість центра мас фізичної поверхні;  $V^+$  – швидкість центра мас об'ємного середовища;  $\zeta^s = \zeta^s(\bar{V}, p)$ .

Рівняння процесу утворення (зникнення) газових бульбашок має вигляд:

$$v_1 + v_2 = 0 \quad (2)$$

Аналогічні до (1), (2) балансові співвідношення записуємо для об'ємного середовища (піни) всередині труби.

В якості початкового стану двовимірної фізичної поверхні і об'ємного середовища всередині труби приймаємо рівноважний термодинамічний стан, для якого початкові значення параметрів стану такі:

$$T_0^s, S_0^s, p_0^s, e_0^s, C_{0k}^s, M_{0k}^s, T_0^+, S_0^+, p_0^+, e_0^+, C_{0k}^+, M_{0k}^+. \quad (3)$$

Для квазірівноважного стану запишемо рівняння стану [4]:

$$T^s = \partial U^s / \partial S^s; M_i^s = \partial U^s / \partial C_i^s; p^s = \rho^s \partial U^s / \partial e^s. \quad (4)$$

Використовуючи балансові співвідношення і рівняння Гіббса у фазах (+), (s), знаходимо явні вирази виробництва ентропії  $\sigma_+^s, \sigma_s^s$ , за допомогою яких будемо друге основне рівняння термодинаміки (аналогічно як у праці [3]):

$$d\Pi^+ = \bar{Y}_m^+ \cdot d\bar{X}_m^+ + \zeta^+ \cdot dA^+, \quad d\Pi^s = \bar{Y}_n^s \cdot d\bar{X}_n^s + \zeta_q^s \cdot dA_q^s, \quad (5)$$

де  $\bar{X}_m^+, \bar{X}_n^s, A^+, A_q^s$  – векторні і скалярні термодинамічні сили;

$\bar{Y}_m^+, \bar{Y}_n^s, \zeta^+, \zeta_q^s$  – векторні і скалярні термодинамічні потоки;

$\Pi^+, \Pi^s$  – кінетичні потенціали, що є функціями термодинамічних сил,

З співвідношення (5) випливають рівняння процесів:

$$\bar{Y}_m^+ = \partial \Pi^+ / \partial \bar{X}_m^+; \zeta^+ = \partial \Pi^+ / \partial A^+; \bar{X}_n^s = \partial \Pi^s / \partial \bar{X}_n^s; \zeta_q^s = \partial \Pi^s / \partial A_q^s. \quad (6)$$

Рівняння процесів підставляємо в балансові співвідношення (1).

Балансові співвідношення в об'ємній [1,5] і поверхневій фазі (1), початкові умови для об'єму і поверхні (3), стехіометричні рівняння процесу утворення бульбашок (2) складають замкнуту (повну) систему диференціальних рівнянь, що описують термомеханічні гідродинамічні процеси в рідині, а також виникнення (зникнення) і перерозподіл бульбашок газу. В даному випадку рівняння (1) виконують роль узагальнених граничних умов.

Нехтуючи параметрами, що відповідають фізичній поверхні розділу, одержимо рівняння, що є частковим випадком відомих у літературі співвідношень [1,5].

Рівняння для поверхневої фази, що є узагальненими граничними умовами, дають можливість визначати шукані макроскопічні параметри і розподіл швидкостей швидкоплинної рідини, враховуючи при цьому вплив зовнішнього масштабного ефекту, до якого приводять стінки труби. Стінки труби гальмують проходження рідини. При цьому проявляється адгезійний ефект (прилипання часток піни до стінок).

Для опису адгезійного впливу на потік піни стінок використаємо відомі в науковій літературі співвідношення для визначення рівноважної роботи адгезії  $A_{ad}$  [6]

$$A_{ad} = \sigma_{s1} + \sigma_{s2} - \sigma_m, \quad (7)$$

а також формули рівноважної енергії адгезійних зв'язків  $W_{ad}$ , яка уведена у праці [6]

$$W_{ad} = W_{s1} + W_{s2} - W_m. \quad (8)$$

Тут  $\sigma_{s1}, \sigma_{s2}$  – поверхневі натяги контактуючих тіл;  $\sigma_m$  – міжфазний натяг;  $W_{s1}, W_{s2}$  – поверхневі енергії контактуючих тіл;  $W_m$  – міжфазна енергія. В даному випадку індекси "1", "2", "m" відповідають матеріалу стінки "1", середовищу піни "2" і тонкому перехідному шару "2" між ними.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Седов Л.И. *Механика сплошной среды. Т. 1 и т. 2.* - М.: Наука, 1976.
2. Гроот С., Мазур П. *Неравновесная термодинамика.* - М.: Мир, 1964. - 456 с.

3. Юзевич В.Н. Контактные условия в электропроводных системах с физическими поверхностями раздела // ДАН УССР. Сер.А.-1984. – № 8. – С.60-63.
4. Юзевич В. Н. Математическое моделирование приповерхностных явлений быстродвижущейся жидкости в гидродинамической трубе // Гидродинамика больших скоростей. Межвузовский сборник. – Красноярск, 1989. – С. 129–133.
5. Гогосов В. В., Налетова В. А., Шапошников Г. А. Диффузионная и многоскоростная модели двухфазных сред в электрическом поле // Прикладная математика и механика. – 1980. – Т. 44, № 2. – С. 290–300.
6. Юзевич В., Гук О., Сопрунюк П. Моделирование адгезийних зв'язків у твердих тілах з використанням методу розкладу за малим параметром // Комп'ютерна інженерія та інформаційні технології. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – Львів: Вид. нац. у-ту "Львівська політехніка", 2003. – № 481. – С. 58–66.
7. Дуб Я.І., Огірко І.В., Ясінський М.Ф. Математичне моделювання друкарських форм. – Львів: вид-во "Світ" (монографія). – 1994. – 208с.

УДК 621.833.1/001-2

О.Е.Васильєва, к.т.н., Д.С.Борисов (Львівський інститут пожежної безпеки МНС України)

### ВПЛИВ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА КОЕФІЦІЄНТ ТЕРТЯ МІЖ ЗУБЦЯМИ КОЛІС ПРИВОДІВ ПЕРЕДАЧ ПОЖЕЖНОГО УСТАТКУВАННЯ ПРИ ПУСКАХ, ЗУПИНКАХ ТА ПЕРЕМИКАННЯХ

В роботі розглянуто питання впливу зовнішніх динамічних навантажень на коефіцієнт тертя між зубцями коліс передачі пожежного устаткування, наприклад, коробки відбору потужності КОМ-68Б, КОМ-107, КОМ-Ц1А при перехідних процесах. Отримані залежності дають можливість визначати значення коефіцієнта тертя при ударних навантаженнях та врахувати його при визначенні довговічності зубчастих передач.

*Сучасний стан.* В процесі експлуатації зубчастих передач приводів пожежного устаткування може відбуватися розрив кінематичних ланцюгів, тобто утворюється зазор між зубцями коліс передачі. Внаслідок цього в зубчастих передачах при перехідних процесах виникає удар, який призводить до динамічних навантажень зубців. Прикладом можуть бути коробки відбору потужності КОМ – 68Б, КОМ– 107, КОМ – Ц1А. Так, пожежна автоцистерна АЦ-20 (66) має коробку відбору потужності механічну одноступеневу, яка встановлена на боковому люку роздаточної коробки. Привод коробки відбору потужності здійснюється від шестерні первинного вала роздаточної коробки. В пожежній автоцистерні АЦ-30 (53А) коробка відбору потужності також механічна одноступенева і вмонтована в карданну передачу базового шасі, яка йде від коробки передач до заднього моста автоцистерни. Пожежні автоцистерни АЦ-30 (157К), АЦ-40 (131), АЦС-30 (157К), АЦ-30 (130) мають коробку відбору потужності типу КВП-68Б механічну, яка встановлена на коробці передач і з'єднана з її механізмом переключення та ін.

При ударі зубців мають місце різні види фрикційної взаємодії. Відносно переміщення тіл при ударі визначається тангенціальною швидкістю удару, часом удару та силою тертя. Тангенціальна швидкість при ударі зростає і приводить до ковзання [1] та відповідно до зростання коефіцієнта тертя.