

УДК 621.865

Р.М. Рогатинський, д.т.н., проф.; Т.М. Пелешок, к.т.н.; П.О. Леськів; В.І. Пенньонжко;
Р.І. Охнівський

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

МОДЕЛІ РУХУ СИПКОГО ВАНТАЖУ В КРУГЛОМУ БУНКЕРІ

R. Rogatynskiy, Dr., Prof.; T. Peleshok, Ph.D.; P. Leskiv; V. Penionzhko; Ohnivskiy R,

MODELS OF BULK MATERIAL MOVEMENT IN A CIRCULAR BUNKER

Стабільність та якість технологічної обробки сипких вантажів у великій мірі залежить від надійності та точності робіт бункерних систем, які забезпечують завантаження вантажу згідно вимог технологічного процесу. Відповідно, до бункерних систем ставляться високі умови до технологічної надійності та безвідмовності роботи. Цим вимогам, завдяки своєму конструктивному виконанню, у значній мірі відповідають круглі бункери. Проте впливи низки факторів на динамічне переміщення вантажу у круглих бункерах при їх вивантаженні вивчені ще недостатньо.

Метою дослідження є визначення напружено-деформованого стану та встановлення закономірностей переміщення сипкого вантажу у бункерах та його витікання залежно від умов експлуатації.

Завдяки осьовій симетрії круглого бункера розподіл напружень та деформацій у сипкому вантажі відповідатимуть закономірностям осесиметричного напружено-деформованого стану. Відповідно, в циліндричній системі координат $Or\varphi z$, рівняння руху елементарного об'єму вантажу у вертикально розміщеному бункері буде

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{r} + \rho \ddot{r}_t = 0; \quad \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} + \rho(\ddot{z}_t + g) = 0, \quad (1)$$

де ρ - густина вантажу; $\ddot{r}_t$ та $\ddot{z}_t$ - складові вектора прискорення виділеного об'єму;

g - прискорення земного тяжіння.

Компоненти тензора деформації для осесиметричного стану

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}; \quad \varepsilon_\varphi = \frac{u}{r}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}; \quad \gamma_{r\theta} = \gamma_{\varphi z} = 0; \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (2)$$

де u , v та w - прирости деформацій по осях Or , $O\varphi$ та Oz

Вектор швидкості матеріалу $\bar{v}_A = v_r \cdot \bar{e}_r + v_z \cdot \bar{e}_z$. Відповідно швидкості деформацій

$$\dot{\varepsilon}_r = \frac{\partial v_r}{\partial r}; \quad \dot{\varepsilon}_z = \frac{\partial v_z}{\partial z}; \quad \dot{\gamma}_{xz} = \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r}. \quad (3)$$

Для великих деформацій, у випадку монотонної деформації (яка не змінює знак), головні осі тензора напружень співпадають з головними осями тензора швидкостей деформацій $\{\tau_{ij}\} = M\{\dot{\gamma}_{ij}\}$, що відповідає умові

$$\frac{\sigma_r - \sigma_z}{2\tau_{rz}} = \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) / \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \quad (4)$$

Закон зміни вертикальної складової швидкості апроксимуємо залежністю [1]:

$$v_z = v_{z0}(r) = v_0 - k_r r^\alpha, \quad (5)$$

де v_0 - закон зміни швидкості частинки координатою $r = 0$ (по центру отвору);
 k та α - параметри моделі, які в загальному випадку можуть бути функціями від z .

Середня швидкість частинок у шарі з біжучою координатою z

$$v_{zc} = \frac{\iint_{S_z} v_z r dr d\varphi}{S_z} = \frac{2\pi \int_0^{r_z} r(v_{z0} - k_r r^\alpha) dr}{\pi r_z^2} = v_{z0} - \frac{2k_r}{\alpha + 2} \cdot r_z^\alpha, \quad (6)$$

де S_z - площа поперечного перерізу бункера з координатою z та радіусом r_z , $S_z = \pi r_z^2$.

Параметр моделі α визначається експериментально, аналогічно [1], за відомих значень швидкостей на вхідному отворі з бункера $v_{0\min}$, $v_{0\max}$ та усередненої швидкості $v_{0c} = Q/S_0$, де Q - розхід вантажу за 1 секунду, S_0 - площа вивантажувального отвору радіусом r_0 [1]:

$$\alpha = 2 \frac{v_0 - v_{0\min}}{v_{0\max} - v_0}. \quad (7)$$

Кут α приймаємо постійним по висоті бункера $\alpha = \text{const}$ / Параметр $k_0 = k_{r=0}$ на виході із конічного бункера визначається за залежністю:

$$k_0 = (v_{0\max} - v_{0\min}) / r_0^\alpha. \quad (8)$$

Змінний по висоті бункера параметр k_r , можна визначити через параметр k_0 ,

$$k_{pz} = \frac{v_{z\max} - v_{z\min}}{r_z^\alpha} = k_0 \left(\frac{r_0}{r_z} \right)^{\alpha+2} = k_0 \left(\frac{z_0}{z_0 + z} \right)^{\alpha+2}, \quad (9)$$

де z_0 - віддаль від уявної вершини конуса бункера до випускного отвору.

Радіальна складова швидкості v визначається як

$$v_p = \frac{z_0 \rho}{(z_0 + z)^3} \left[v_0 - k_{p0} \left(\frac{\rho z_0}{z_0 + z} \right)^\alpha \right]. \quad (10)$$

Відповідно, для i -ої частинки вантажу, що рухається конкретною траєкторією, яка визначається кутом нахилу її траєкторії ($\delta = \delta_i$), закон зміни швидкості v_{z_i} є функцією лише одного параметру z .

$$v_{z_i} = \frac{dz}{dt} = v_0 \left(\frac{z_0}{z_0 + z} \right)^2 - k_{p0} \left(\frac{\rho z_0}{z_0 + z} \right)^\alpha \left(\frac{z_0}{z_0 + z} \right)^2 = \left(\frac{z_0}{z_0 + z} \right)^2 \left[v_0 - k_{p0} (z_0 \text{tg} \delta_i)^\alpha \right]. \quad (11)$$

Закон руху довільної частинки суміші з початковими параметрами φ_A , r_A та z_A і $\text{tg} \delta_A = r_A / (z_0 + z_A)$ визначається за залежністю

$$z = \sqrt[3]{(z_A + z_0)^3 - 3z_0^2 [v_0 - k_{p0} (z_0 \text{tg} \delta_A)^\alpha] \cdot t} - z_0. \quad (12)$$

Розроблена модель дозволяє, на основі отриманого розподілу швидкостей в просторі круглого бункера, в подальшому повністю розрахувати його напружено-деформований стан на основі залежностей (1-4).

Література

1. Гевко І.Б., Пелешок Т.М., Рогатинська Л.Р. Дослідження переміщення сипкого вантажу в робочому просторі бункерних систем. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2009. №78. С 322 - 332.