

4. Давиденко М.А. Прочностные и деформативные характеристики сталефибробетонных труб вертикального вибропрессования / М.А. Давиденко, Н.Д. Высоцкая // Науковий вісник Луганського національного аграрного університету. – 2012. – № 41. – С. 269–275.

В статье приведены зависимости для расчета прочности фибробетонных элементов кольцевого сечения нормальных к продольной оси на основе основных предпосылок, которые отвечают новым национальным стандартам Украины.

Прочность, элемент, армирования, базальт, фибра.

The paper presents the dependences for calculation of strength of steel fiber-reinforced elements of circular cross-section normal to the longitudinal axis on basis of basic preconditions which meet national standards of Ukraine.

Strength, element, reinforcement, basalt, fiber.

УДК 62:534(031)

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВІБРАЦІЙНОГО ТРАНСПОРТУВАННЯ КОРМОСУМІШЕЙ

В.С. Ловейкін, доктор технічних наук

Ю.В. Човнюк, А.В. Гудова, кандидати технічних наук

Наведена математична модель процесу вібраційного транспортування кормосумішей. Встановлені основні віброреологічні характеристики кормосуміші у процесі її транспортування.

Математичне моделювання, вібрація, транспортування, кормосуміш.

Постановка проблеми. При дії вібрації на нелінійні механічні системи виникають своєрідні явища, котрі не властиві лінійним системам. З однієї сторони, такі явища слід враховувати, оскільки вони призводять до небажаних побічних ефектів. З іншого боку, ці явища можна використати для отримання корисних ефектів у різних областях техніки та технологій (у т.ч. сільськогосподарського виробництва та переробки сировини).

© В.С. Ловейкін, Ю.В. Човнюк, А.В. Гудова, 2014

До числа таких явищ можна віднести:

- 1) ефект вібраційного переміщення кормосумішей;
- 2) зміну під впливом вібрації реологічних властивостей суміші по відношенню до повільних впливів (зменшення ефективних коефіцієнтів сухого тертя при вібрації, уявне перетворення сил сухого тертя у сили в'язкого тертя, зміна «ефективної в'язкості» суміші при її турбулентній течії тощо).

Для всіх перерахованих процесів і явищ у кормосуміші характерно, що виникаючі у ній під дією вібрації рухи $x = X + \psi$ представляють собою суперпозицію «швидких» високочастотних коливань ψ на «повільний» еволюційний рух суміші X . При цьому основний інтерес, як правило, представляє саме повільний рух.

Аналіз останніх досліджень. Основні положення механіки повільних рухів при дії вібрації на нелінійні системи, метод прямого розділення рухів, тобто підхід до пояснення й математичного опису явищ, що мають місце у процесах вібротранспортування кормосумішей, викладені у роботі І.І. Блехмана [3].

Цей підхід заснований на переході від рівнянь руху для сумарної складової руху x , що записується у відповідності зі звичайними законами механіки, до рівнянь для повільної складової X .

Виявляється, що ці рівняння для X отримують додаванням до всіх повільних сил, діючих на систему, деяких додаткових повільних сил, які обчислюються за певним правилом й називаються вібраційними узагальненими силами. Саме цей метод і буде використаний у даному дослідженні.

Мета досліджень полягає у встановленні основних закономірностей вібротранспортування кормових сумішей, їх віброреологічних характеристик у цьому процесі.

Результати досліджень. Слід зазначити, що у даному дослідженні, коли будуть описуватись зміни реологічних властивостей компонентів кормосуміші чи зміни закономірностей поведінки суміші в цілому під дією вібрації, завжди будемо мати на увазі властивості й закономірності по відношенню до повільних складових руху X .

Віброреологічні рівняння течії кормосуміші. Для останніх років характерним є інтенсивність накопичення фактів і результатів, які відносяться до впливу вібрації на різноманітні складні середовища – неоднорідні тверді тіла, сипкі тіла, будівельні суміші, полімерні матеріали, суспензії, кормосуміші [1, 9, 19]. При цьому найбільший інтерес для техніки й технологій сільськогосподарського виробництва і переробки сировини представляють випадки, коли під дією вібрації поведінка кормосуміші різко змінюється. П.О. Лебіндер [5] запропонував називати відповідний розділ механіки

віброреологію. Автор [3] визначає віброреологію як область механіки, у котрій вивчається зміна реологічних властивостей тіл по відношенню до повільних сил під впливом вібрації. Виходячи з цього визначення, відповідні рівняння повільного руху можна назвати віброреологічними рівняннями (тобто рівняння руху в'язкої рідини, яка не стискується, при відсутності об'ємних сил):

$$\begin{cases} \rho \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho \cdot (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} = -\vec{\nabla} p + \mu \nabla^2 \vec{u}; \\ (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де ρ – щільність в'язкої рідини (модель рухомої кормосуміші); $\vec{u} = \vec{u}(x, y, z, t)$ – вектор швидкості руху; (x, y, z) – просторові координати; t – час; p – тиск; μ – в'язкість рідини (динамічна), Па·с; $\vec{\nabla}$ – оператор Гамільтона («набла»); $\nabla^2 \equiv \Delta$ – оператор Лапласа; вирази, які стоять у круглих скобках символізують скалярний добуток відповідних величин.

У рівняннях (1) вважаємо, що:

$$\vec{u} = \vec{U} + \vec{u}'; \quad p = P + p', \quad (2)$$

де \vec{U} й P – повільні, а \vec{u}' й p' – швидкі (пульсаційні) складові відповідно швидкості й тиску (турбулентна течія рідини). З урахуванням (2) та підходу І.І. Блехмана [1] рівняння (1) набувають остаточного вигляду:

$$\begin{cases} \rho \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \rho \cdot (\vec{U} \cdot \vec{\nabla}) \vec{U} = -\vec{\nabla} P + \mu \nabla^2 \vec{U} - \vec{w}; \\ (\vec{\nabla} \cdot \vec{U}) = 0, \quad \vec{w} = \rho \cdot \langle (\vec{u}' \cdot \vec{\nabla}) \cdot \vec{u}' \rangle, \end{cases} \quad (3)$$

котрі у літературі мають назву рівнянь Рейнольдса [2].

У (3) через $\langle \dots \rangle = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} (\dots) dr$ позначений оператор усереднення

по швидкому часу $\tau = wt$ (w – кругова частота вібрації), котрий входить у вираз \vec{w} явно:

$$\vec{u}' = w \cdot [A_x(x, y, z, t) \cdot \vec{i} + A_y(x, y, z, t) \cdot \vec{j} + A_z(x, y, z, t) \cdot \vec{k}] \cdot \sin wt, \quad (4)$$

де $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ – орти вповдовж відповідних осей координат (0X, 0Y, 0Z), (A_x, A_y, A_z) – амплітуди переміщень (кормосуміші) вповдовж відповідних осей, які, у загальному випадку, є функціями (x, y, z, t) . Оскільки:

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin^2 \tau d\tau = \frac{1}{4\pi}, \quad (5)$$

де $\pi = 3,1415926$, тоді \tilde{W} можна подати так:

$$\vec{w} = \rho \cdot \frac{w^2}{4\pi} \cdot \left\{ \begin{aligned} & \left[A_x \cdot \frac{\partial A_x}{\partial x} + A_y \frac{\partial A_x}{\partial y} + A_z \frac{\partial A_x}{\partial z} \right] \cdot \vec{i} + \\ & + \left[A_x \cdot \frac{\partial A_y}{\partial x} + A_y \frac{\partial A_y}{\partial y} + A_z \frac{\partial A_y}{\partial z} \right] \cdot \vec{j} + \\ & + \left[A_x \cdot \frac{\partial A_z}{\partial x} + A_y \frac{\partial A_z}{\partial y} + A_z \frac{\partial A_z}{\partial z} \right] \cdot \vec{k} \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

Подамо перше рівняння системи (3) з урахуванням виразу (6) так:

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + (\vec{U} \cdot \vec{\nabla}) \vec{U} = -\frac{\vec{\nabla} P}{\rho} + \nu \nabla^2 \vec{U} - \frac{\vec{w}}{\rho}, \quad (7)$$

де $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ – кінематична в'язкість рідини, $\text{м}^2/\text{с}$.

Після деяких математичних перетворень рівняння (7) набуває вигляду:

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + (\vec{U} \cdot \vec{\nabla}) \vec{U} = -\frac{\vec{\nabla} P}{\rho} + \nu^* \nabla^2 \vec{U}, \quad (8)$$

де $\nu^* = \nu - \frac{w^2 \left(\sum_{l=1}^3 A_l \cdot \frac{\partial A_m}{\partial x_l} \right)}{\nabla^2 U_m}$, $m = (\overline{1,3})$.

Зрозуміло, що $\nu^* < \nu$ і враховує вібраційний вплив на в'язкість кормосуміші. Зробимо «феноменологічну» оцінку ν^* . Вважаємо, що $U_m \ll V$ (швидкість руху маси кормосуміші у горизонтальному напрямку – вдовж вісі шнеку); $A_l \ll A$ (амплітуда вібрацій, м); $X_l \ll R$ (поперечний радіус кожуху шнека для вібротранспортування кормосуміші), м; L – довжина вісі шнеку (у поздовжньому напрямку), м. (Тоді X_l точніше виражати як $X_l \ll \sqrt{L \cdot R}$, тобто як середньоквадратичний розмір жолобу для транспортування кормосуміші).

Отже, маємо дві наступні оцінки ν^* :

1). $X_l \ll R$ –

$$\nu^* = \nu - \frac{w^2 A^2 \cdot R}{4\pi V}, \quad \nu^* = \nu - \tilde{\nu}_{\text{вібрації}}, \quad \tilde{\nu}_{\text{вібрації}} = \frac{w^2 A^2 \cdot R}{4\pi V}; \quad (9)$$

2). $X_l \ll \sqrt{L \cdot R}$ –

$$v^* = v - \frac{w^2 A^2 \sqrt{L \cdot R}}{4\pi V}, \quad v^* = v - \tilde{v}_{\text{вiбpацiї}}^*, \quad \tilde{v}_{\text{вiбpацiї}} = \frac{w^2 A^2 \sqrt{L \cdot R}}{4\pi V}. \quad (10)$$

Нижче, у табл. 1 наведені значення «вібраційної» поправки до кінематичної в'язкості $\tilde{v}_{\text{вiбp}}$ кормосуміші, яка зменшує її вихідну (v^*) в'язкість (кінематичну) при $w = 2\pi \cdot 50 \frac{1}{c} = 314 c^{-1}$, $L = 3 м$ для різних $A, м$ та $R, м$ при $V = 0,05 \frac{м}{c}$.

1. «Вібраційна» поправка $\tilde{v}_{\text{вiбpацiї}}, \frac{м}{c}$ кормосуміші.

$R, м$	$A, м$				
	$1 \cdot 10^{-3} м$	$2 \cdot 10^{-3} м$	$3 \cdot 10^{-3} м$	$4 \cdot 10^{-3} м$	$5 \cdot 10^{-3} м$
0,2	0,0314	0,1256	0,2826	0,5024	0,7850
0,4	0,0628	0,2512	0,5652	1,0048	1,5700
0,6	0,0942	0,3768	0,8478	1,5072	2,3550
0,8	0,1256	0,5024	1,1304	2,0096	3,1400

У табл. 2 наведені значення «вібраційної» поправки до кінематичної в'язкості $\tilde{v}_{\text{вiбp}}$ кормосуміші, яка зменшує її вихідну (v^*) кінематичну в'язкість при $w = 2\pi \cdot 50 \frac{1}{c} = 314 c^{-1}$, $R = 0,4 м$ для різних $L, м$ та $A, м$ при $V = 0,05 \frac{м}{c}$.

2. «Вібраційна» поправка $\tilde{v}_{\text{вiбpацiї}}, \frac{м}{c}$ кормосуміші.

$L, м$	$A, м$				
	$1 \cdot 10^{-3} м$	$2 \cdot 10^{-3} м$	$3 \cdot 10^{-3} м$	$4 \cdot 10^{-3} м$	$5 \cdot 10^{-3} м$
1	0,1000	0,4000	0,9000	1,6000	2,5000
3	0,1732	0,6928	1,5588	2,7712	4,3300
5	0,2236	0,8944	2,0124	3,5776	5,5900
7	0,2646	1,0584	2,3814	4,2336	6,6150

Моделювання процесу дифузії компонент кормосуміші при її транспортуванні за допомогою шнеку і наявного поля вібрації. Аналогічні моделі та процеси досліджувались тривалий час для ущільнюваних бетонних сумішей. Так, у роботах [8, 10, 11, 12] показано, що у стаціонарному потоці при певних параметрах вібраційних впливів бетонні суміші теж поведуться як ньютонівські системи (як і кормосуміші). Виходячи з цього, доцільно прийняти у якості математичної моделі коливань кормосуміші рівняння Стокса ізотермічного руху ньютонівської в'язкої рідини, яка не стискується:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \overrightarrow{\text{grad}} p + \nu \cdot \nabla^2 \cdot \vec{V}, \quad (11)$$

або в проекції на вісь OX (напрямок переміщення кормосуміші шнеком):

$$\frac{\partial V_x}{\partial t} = F_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} \right), \quad (12)$$

де (x, y) – декартові координати, V_x – проекція швидкості руху кормосуміші на вісь OX , t – час, F_x – проекція масових сил, ρ – щільність кормосуміші, P – тиск у точці кормосуміші, ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості.

Величина $V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} \ll \frac{\partial V_x}{\partial t}$, як правило, тому у рівняннях (11), (12) нею можна знехтувати, $F_x = 0$.

У відповідності з [17] замість $\left(-\frac{\partial p}{\partial x} \right)$ у рівняння (12) введено $E \cdot \frac{\partial^2 l}{\partial x^2}$, де E – модуль пружності, l – переміщення елементарного її об'єму, а швидкість розповсюдження коливань у пружнов'язкому середовищі із врахуванням роботи [13] може бути подана у виді $c \approx \sqrt{E/\rho}$. Тоді рівняння (12) набуває виду [7]:

$$\frac{\partial V_x}{\partial t} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 l}{\partial x^2} + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} \right), \quad (13)$$

де $V_x = \frac{\partial l}{\partial t}$ – швидкість переміщення елементарного об'єму середовища (кормосуміші) [15].

Динамічний тиск σ визначається у стаціонарному режимі після закінчення фази зміни об'єму кормосуміші за фазового кута $\alpha = \omega t$ по формулі:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E \cdot \frac{\partial l}{\partial x}, \quad (14)$$

де ε – відносна деформація, ω – кутова швидкість [4].

Фізичний зміст фазового кута полягає у зміні граничних умов у часі за періодичним законом.

Як відомо, в'язке тертя (внутрішнє тертя) – це тертя між прошарками суцільного середовища, яке коливається, тому замість другого члена у правій частині рівняння (13), особливо для високих стовпів кормосуміші, можна прийняти $\nu \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2}$, де y – координата, що

перпендикулярна напрямку руху кормосуміші (під дією шнека), тобто координаті x .

Отже, із врахуванням (13) процес формоутворення (й зміни форми) кормосуміші (при симетричних вертикально спрямованих коливаннях) можна подати у вигляді:

$$\frac{\partial V_x}{\partial t} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 l}{\partial x^2} + v \cdot \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2}. \quad (15)$$

Хоча більш точним є рівняння (13).

Зміна концентрації компоненти суміші при коливаннях системи визначається з рівняння дифузії Ейнштейна-Колмогорова [18], яке іноді називають рівнянням Фоккера-Планка [14, 15]:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = -V \cdot \frac{\partial W}{\partial x} + D \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad (16)$$

де W – об'ємна концентрація компоненти суміші; D – коефіцієнт дифузії у напрямку руху шнека (вісь Ox); V – швидкість руху шнека (у напрямку вісі Ox), величина якої незмінна у часі й задається технологічними вимогами транспортування кормосуміші лотка.

Отже, вихідна математична модель процесу розповсюдження симетричних коливань у двофазному середовищі (сама кормосуміш+диффундуючий у ній конкретний компонент) має вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial V_x}{\partial t} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 l}{\partial x^2} + v \cdot \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2}; \\ \frac{\partial W}{\partial t} = -V \cdot \frac{\partial W}{\partial x} + D \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \end{cases} \quad (17)$$

де $c^2 = \frac{E(x,t)}{\rho} = \text{var}$; $\rho = f_1(W)$; $c = f_2(W)$; $v = f_3(A, w, W, V) = \text{var}$.

Щільність кормосуміші, у якій є додатковий «розчинений» у ній компонент, має вид:

$$\rho = \rho_c \cdot (1 + W), \quad (18)$$

де ρ_c – щільність кормосуміші за відсутності додаткового, «розчиненого» у ній компонента. Модуль пружності кормосуміші з додатковим компонентом має вид:

$$E(x,t) = \frac{E_c}{1 + \frac{E_c}{E_k} \cdot W}, \quad (19)$$

де E_c – модуль пружності кормосуміші без нового компоненту, E_k – модуль пружності компоненту.

Із врахуванням (18), (19) швидкість розповсюдження коливань у кормосуміші подається у вигляді:

$$C = \frac{C_c}{\sqrt{(1+W) \cdot \left[1 + \left(\frac{C_c}{C_k} \right)^2 \cdot \frac{\rho_c}{\rho_k} \cdot W \right]}}, \quad (20)$$

де C_c – швидкість розповсюдження коливань у кормосуміші без компонента; C_k – швидкість розповсюдження коливань у компоненті; ρ_k – щільність компонента.

Висновки

1. Отримана адекватна математична модель процесу вібраційного транспортування кормосумішей, а саме швидкість розповсюдження коливань у кормосуміші.

2. Отримані у роботі результати можуть у подальшому слугувати для уточнення й вдосконалення існуючих інженерних методів розрахунку систем вібротранспортування кормосумішей.

Список літератури

1. Альберт И.У. О реологических моделях вибрируемой бетонной смеси / И.У. Альберт, О.А. Савинов // Известия Всесоюз. научно-исслед. ин-та гидротехники. – Л., 1974. – Т. 105. – С. 136–146.
2. Блехман И.И. Действие вибраций на механические системы / И.И. Блехман // Вибротехника. – Вильнюс: Минтис, 1973. – №3 (20). – С. 369–374.
3. Блехман И.И. Метод прямого разделения движений в задачах о действии вибрации на нелинейные механические системы / И.И. Блехман // Известия АН СССР. Серия: Механика твердого тела. – 1976. – № 6. – С. 13–27.
4. Блехман И.И. Синхронизация динамических систем / И.И. Блехман. – М.: Наука, 1971. – 894 с.
5. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти томах / Ред. совет: В.Н. Челомей (ред.). – М.: Машиностроение, 1979. – Т. 2. Колебания нелинейных механич. систем / Под ред. И.И. Блехмана. – 1979. – 351 с.
6. Ганиев Р.Ф. Динамика частиц при воздействии вибраций / Р.Ф. Ганиев, Л.Е. Украинский. – К.: Наукова думка, 1975. – 168 с.
7. Грушко И.М. Математическое моделирование реологического поведения бетонных смесей при виброформовании / И.М. Грушко, Б.А. Лишанский, А.С. Петров // В кн.: Реология бетонных смесей и ее технологические задачи. – Рига, 1979. – С. 210–212.
8. Куннос Г.Я. Вибрационная технология бетона / Г.Я. Куннос. – Л.: Строиздат, 1967. – 168 с.
9. Липовский М.И. Об одном виде вибрационного перемещения сыпучей среды / М.И. Липовский // Известия АН СССР. Серия Механика твердого тела. – 1969. – №3. – С. 3–9.
10. Лишанский Б.А. Исследование виброуплотнения дисперсных систем / Б.А. Лишанский, Б.П. Осмачкин, Н.В. Михайлов, П.А. Ребиндер // Доклады АН СССР. – 1969. – Т. 184, №4. – С. 900–903.
11. Лишанский Б.А. Исследование реологических свойств дисперсных структурированных систем при вибрационном перемещении / Б.А. Лишанский, Н.В. Михайлов, П.А. Ребиндер // Доклады АН СССР. – 1968. – Т. 181, №6. – С. 1436–1439.

12. *Лишанский Б.А.* Физико-химическая механика бетона – научная основа вибрационного перемещения бетонных смесей / *Б.А. Лишанский, Н.В. Михайлов* // Доклады АН СССР. – 1967. – Т. 175, №5. – С. 1101–1104.
13. *Михайлов И.Г.* Распространение ультразвуковых волн в жидкостях / *И.Г. Михайлов*. – М.: Физматгиз, 1949. – 152 с.
14. *Петров А.С.* Распространение колебаний в высоких столбах уплотняемой бетонной массы / *А.С. Петров, Б.А. Лишанский, Э.Э. Рафалес-Ламарка* // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1979. – №12. – С. 62–66.
15. *Петров А.С.* Распространение колебаний в двухфазных дисперсных структурированных системах / *А.С. Петров, Б.А. Лишанский* // Инженерно-физический журнал. – 1979. – Т. 37, №4. – С. 613–619.
16. *Рафалес-Ламарка Э.Э.* Математическое моделирование процесса продольно-горизонтального виброформирования лёгких бетонов / *Э.Э. Рафалес-Ламарка, Б.А. Лишанский, А.С. Петров* // Горные, строительные и дорожные машины. – К.: Техника, 1980. – Вып. 29. – С. 80–83.
17. *Седов Л.И.* Механика сплошной среды / *Л.И. Седов*. – М.: Наука, 1973. – Т. 2. – 584 с.
18. *Тихонов А.Н.* Уравнения математической физики / *А.Н. Тихонов, А.А. Самарский*. – М.: Наука, 1966. – 724 с.
19. *Членов В.А.* Сушка сыпучих материалов в виброкипящем слое / *В.А. Членов, Н.В. Михайлов*. – М.: Строиздат, 1967. – 224 с.

Приведена математическая модель процесса вибрационного транспортирования кормосмесей. Установлены основные виброреологические характеристики кормосмесей в процессе их транспортирования.

Математическое моделирование, вибрация, транспортирование, кормосмесь.

The mathematical model of process of vibrotransportation of mixes is given. The main vibrorheological characteristics of mixes in process of transportation are established.

Mathematical modeling, vibration, transportation, feed mixture.

УДК 631.171:519.87

ОСНОВНІ МЕТОДИ ПОШУКУ ТА ОТРИМАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ МОНІТОРИНГУ В АПК УКРАЇНИ

***В.Н. Большаков, кандидат юридичних наук
О.О. Броварець, кандидат технічних наук***

© В.Н. Большаков, О.О. Броварець, 2014