

Є.В.Штефан, канд. техн. наук

Національний університет харчових технологій м.Київ, Україна

ТЕОРЕТИЧНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБРОБКИ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ У ШНЕКОВИХ ПРИСТРОЯХ

Представлена методика визначення технологічних параметрів процесів шнекового нагнітання та пресування дисперсних матеріалів. Методика враховує конструктивно-технологічні параметри шнека, а також реологічні та структурно-механічні властивості дисперсних систем.

The technique of the definition of technological parameters of the screw forcing and pressing of disperse materials is submitted. The technique takes into account the screw constructive - technological parameters, and also reological and structural - mechanical properties of disperse systems.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими прикладними завданнями. Шнекові пристрої знаходять своє застосування у багатьох галузях харчової, енергетичної та хімічної промисловості. Як правило, вони використовуються для транспортування та пресування дисперсних матеріалів у машинах та апаратах різного технологічного призначення. Оскільки структурно-механічні параметри дисперсних матеріалів, що переробляються суттєво відрізняються у різних технологіях, тому особливої актуальності набуває завдання по проектуванню відповідних спеціальних шнекових пристроїв. Аналіз останніх досліджень [1] у галузі проектування шнекових пристроїв свідчить, що для визначення технологічних параметрів традиційно використовуються теорії побудовані на емпіричній основі, без урахування параметрів дисперсності матеріалів, що обробляються. У роботах [2, 3]

започатковано створення наукових основ проектування шнекових пристроїв з урахуванням конструктивних особливостей обладнання та структурно-механічних параметрів матеріалів. Метою даної роботи є систематизація досліджень, що проведені у роботах [2 - 4] і на їх результатах розробка методологічного підходу до визначення основних технологічних параметрів процесів транспортування та пресування дисперсних матеріалів у шнекових пристроях.

Теоретичне визначення технологічних параметрів обробки матеріалів у шнекових пристроях неможливе без встановлення взаємозв'язку між конструктивними (розміри міжвиткового простору, частота обертання вала та ін.) і технологічними (продуктивність, фізико-механічні характеристики оброблюваного матеріалу, тиск в об'ємі пресованого матеріалу та ін.) параметрами шнека. В основу представленої методики (рис.1) покладено розглядання технологічного процесу як мульти-компонентної системи взаємозв'язаних об'єктів досліджень [4]: дисперсної суміші, елементів технологічного обладнання, термомеханічного навантаження та ін.

Розглянемо узагальнену схему шнекового пристрою (рис.2) з постійною кутовою швидкістю обертання вала ω . Основні геометричні параметри шнека (крок витка $H(x)$, діаметр вала $d(x)$, діаметр корпусу $D(x)$) можуть змінюватися по довжині шнека. Розрахункова схема процесу руху матеріалу в міжвитковому просторі шнека побудована на принципі його ототожнення з рухом матеріалу в каналі змінного перерізу (рис. 2, а).

Аналitична модель процесу деформування дисперсних матеріалів як складова частина математичної моделі [4, 5] базується на концепції представлення дисперсного матеріалу у вигляді двофазної суміші: твердих часток (твердої дисперсної фази) і газорідкого дисперсійного середовища. Для моделювання поведінки таких матеріалів треба використовувати такі традиційні поняття: напруження, деформація, густина, а також швидкості змінення цих параметрів.

Зазначені тензорні й скалярні характеристики мають локальну природу і визначаються за допомогою операцій граничного переходу, коли елементи простору (об'єми та елементи поверхонь) стягуються до точок.

Класичне уявлення про частку в механіці дисперсних систем [5] складається з ототожненням її з твердими зернами різної дисперсності. Виникає такий парадокс: кожна частка дисперсного матеріалу за своєю суттю являє собою деформоване тверде тіло. Оскільки кожна дискретна частка взаємодіє із сусідніми частками, то розподіл напружень в ній неоднорідний. Тому, для спрощення математичного описання механічної поведінки дисперсних матеріалів, будемо використовувати для відповідних параметрів просторове осереднення за твердою і газорідкою фазами [6].

Розглядається модель дисперсної системи, що складається із твердої дисперсної фази та газорідкого дисперсійного середовища. Рівняння збереження маси для окремих фаз мають вигляд [5, 6]

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} \alpha_1 + \text{div}(\rho_1 \alpha_1 u) = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial t} \alpha_2 + \text{div}(\rho_2 \alpha_2 v) = 0;$$



Рис. 1. Схема визначення технологічних параметрів процесу обробки дисперсних матеріалів у шнекових пристроях

де u, v - вектори середньої швидкості переміщень твердих часток і рідини відповідно; ρ_1, ρ_2 - відповідно середні густини фаз; α_1, α_2 - об'ємні концентрації твердої та газорідкої фаз відповідно.

Рух та деформування дисперсних матеріалів в умовах механічного навантаження описуються рівняннями збереження кількості руху в макро-координатах [3, 5] для:

а) твердої фази

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_1 \rho_1 u) + \text{grad}(\alpha_1 \rho_1 u \times u) - \text{grad}(\alpha_1 \sigma) - F_1 - F^{(1)} = 0; \quad (2)$$

б) газорідкої фази

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_2 \rho_2 v) + \text{grad}(\alpha_2 \rho_2 v \times v) - \text{grad}(\alpha_2 P) - F_2 + F^{(2)} = 0; \quad (3)$$

де P - гідростатичний тиск у газорідкій фазі; F_1, F_2 - вектори об'ємних сил у твердій і рідкій фазах відповідно; σ - тензор напружень у твердій фазі; $F^{(1)}, F^{(2)}$ - сили міжфазної взаємодії.

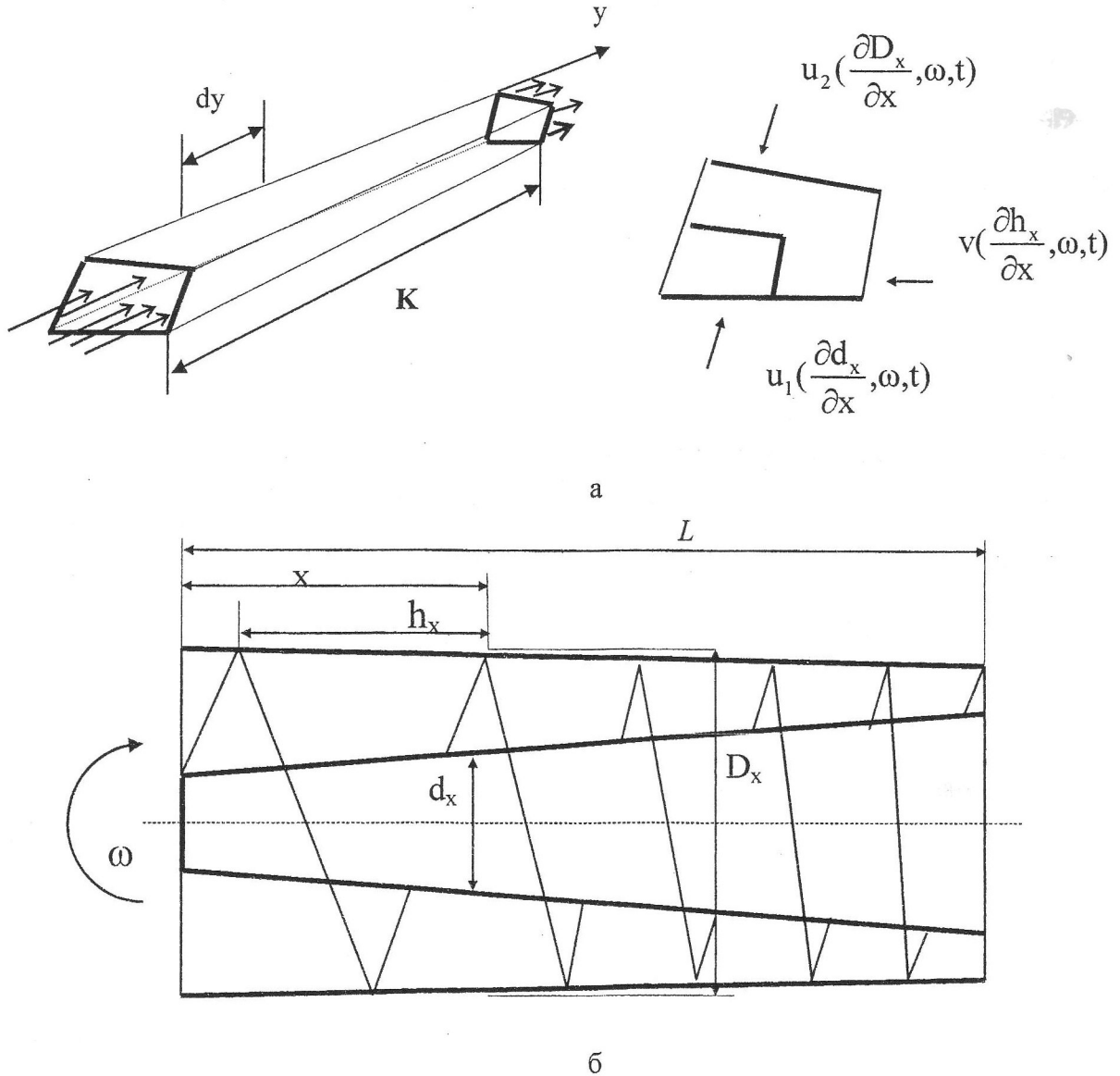


Рис.2. Розрахункова схема руху та пресування дисперсного матеріалу (а) у шнековому пристрої із заданими конструктивними параметрами (б)

Внаслідок рівності

$$P \cdot n = -\sigma \cdot n, \quad (4)$$

у точках внутрішніх поверхонь розподілу газорідкої та твердої фаз (n - вектор нормалі до поверхні розподілу) виконується умова:

$$F^{(2)} = F^{(1)} = F^0 \quad (5)$$

Вважається, що швидкості руху точок дисперсного середовища малі, і це дає підставу нехтувати в рівняннях (2, 3) конвективними членами.

Якщо задати силу міжфазної взаємодії у формі [6]

$$F^0 = F^{(1)} = F^{(2)} = R + P \operatorname{grad} \alpha_2, \quad (6)$$

то, враховуючи, що $\alpha_1 = 1 - \alpha_2$, рівняння відносного руху твердої фази приймає вигляд:

$$\alpha_1 \left(\rho_1 \frac{du}{dt} - \rho_2 \frac{dv}{dt} \right) - \text{grad} \sigma^f - \frac{R}{\alpha_2} - \alpha_1 (\rho_1 - \rho_2) G = 0; \quad (7)$$

де $R = \frac{\mu}{a^2} \alpha_1 \alpha_2 (v - u)$ ефективна сила в'язкого опору;

σ^f - тензор ефективних напружень [6].

Рівняння відносного руху рідкої фази можна подати у вигляді [4]:

$$\rho_2 \frac{dv}{dt} = -\text{grad} P - \frac{R}{\alpha_2} + \rho_2 G, \quad (8)$$

де G - вектор прискорення вільного падіння.

Зазначимо, що для процесів, які протікають повільно, (відсутні інерційні ефекти:

$\rho_2 \frac{dv}{dt} = 0$; $\rho_2 G = 0$) рівняння (8) описує закон фільтрації в пористому ізотропному середовищі:

$$w = v - u = -\frac{a^2}{\mu \alpha_1} \text{grad} P. \quad (9)$$

Отримане співвідношення аналогічне закону Дарсі з теорії фільтрації [5]

$$v - u = -\frac{k^p}{\alpha_1} \text{grad} P, \quad (10)$$

де k^p - коефіцієнт проникності скелету твердої фази.

Аналітична модель процесу транспортування матеріалу у шнековому пристрої базується на припущенні, що відносно корпусу шнека частки матеріалу рухаються паралельно осі вала шнека. За один оберт шнека (період $t = 2\pi/\omega$) довільна частка середовища переміщується вздовж осі вала шнека на відстань кроку гвинтової лінії $H(x)$ (рис. 2, а). Швидкість переміщення цієї частки вздовж осі вала шнека

$$V(x) = \frac{H(x)}{t} = \frac{\omega H(x)}{2\pi}. \quad (11)$$

Оскільки $\frac{dx}{dt} = V(x)$, маємо $dt = \frac{dx}{V(x)}$. Таким чином, тривалість проходження

часткою матеріалу довільної відстані S від початкової точки вала шнека

$$t = \int_0^S \frac{dx}{V(x)}. \quad (12)$$

Тривалість проходження часткою всієї довжини шнека L (рис. 2) дорівнює

$$T = \int_0^L \frac{dx}{V(x)}. \quad (13)$$

Розглянемо нескінченно малий елемент dy розгортки бокової поверхні корпусу шнека (рис. 2, а). За теоремою Піфагора

$$\frac{dy}{dx} = \sqrt{[\pi D(x)]^2 + [H(x)]^2} \frac{1}{H(x)}. \quad (14)$$

Тобто співвідношення між координатою x вздовж осі вала шнека та координатою y вздовж каналу має вигляд

$$y = \int_0^x \sqrt{[\pi D(z)]^2 + [H(z)]^2} \frac{1}{H(z)} dz. \quad (15)$$

При $x = L$ загальна довжина каналу шнека

$$Y = \int_0^L \sqrt{[\pi D(x)]^2 + [H(x)]^2} \frac{1}{H(x)} dx. \quad (16)$$

Основним параметром, що визначає продуктивність шнекового пристрою, є масова витрата матеріалу під час його руху по каналу з довжиною Y . З урахуванням (11), (14) масова витрата $Q(x)$ дисперсного матеріалу густини ρ у шнеку довільної довжини x (рис. 2) при площі шнекового каналу $F(x)$ визначається так:

$$Q(x) = \frac{\omega \rho(x) F(x) \sqrt{[\pi D(x)]^2 + [H(x)]^2}}{2\pi}. \quad (17)$$

Таким чином, формули (12)–(17) встановлюють взаємозв'язок між геометричними і кінематичними параметрами процесу транспортування матеріалу у шнековому пристрої (рис. 2, б).

Алгоритмічна модель, як складова частина математичної моделі процесу руху та деформування дисперсних матеріалів, базується на:

- розв'язанні крайової задачі пружно-в'язко-пластичності деформування дисперсного матеріалу у межах розрахункової схеми (рис. 2) з використанням методів скінчених елементів по просторовим параметрам та скінчених різниць по часовому аргументу;

- розрахунку процесу транспортування матеріалу у міжвитковому просторі шнека.

Згідно методу скінчених різниць процес пресування матеріалу в міжвитковому просторі об'єму V^0 умовно розділяємо на фіксовані часові кроки Δt . На кожному i -му кроці Δt_i виконується послідовність дій:

1. Завдання початкових умов (геометричні розміри каналу та закон їх зміни, структурно-механічні характеристики матеріалу).

2. Згідно методики [3] досліджуємо рух та деформування матеріалу по каналу змінного перерізу та визначаємо розподілення тиску та швидкостей руху часток твердої та рідкої фаз в об'ємі міжвиткового простору шнека.

3. Градієнтом тиску по перерізу каналу (рис.2, а), згідно з законом Дарсі (9), (10), визначаємо швидкість v виходу рідкої фази крізь частки твердої фази. Внаслідок відокремлення рідкої фази відбувається ущільнення дисперсного матеріалу, яке кількісно оцінюємо густиною матеріалу.

4. Визначаємо об'єм ΔV^i та маси Δm^i рідини, що виходить через поверхню шнекової камери.

$$\Delta V^i = \Delta t_i \alpha_2 C_f \int_F v n dF; \Delta m^i = \rho^i \Delta V^i,$$

де C_f – коефіцієнт проникності поверхні шнекової камери, який дорівнює відношенню площі отворів до загальної площі поверхні.

5. Визначаємо об'ємну концентрацію рідкої фази дисперсній суміші в міжвитковому просторі у даний момент часу

$$\alpha_2^i = \alpha_2^{i-1} - \Delta V^i / V^0. \quad (18)$$

6. Продуктивність шнекового пристрою залежно від його конструктивно-технологічних параметрів визначаємо співвідношенням (7).

Висновок. Запропоновано наукові основи проектування шнекових пресів з урахуванням їхніх конструктивних параметрів та структурно-механічних властивостей матеріалу, що пресується. Розроблений метод дозволяє визначити технологічні параметри в процесах пресування дисперсних матеріалів у шнекових пристроях. У подальшому планується апробувати представлену методику для різних типів шнекового обладнання.

Список літератури

1. Радченко Л.Б., Сівецький В.І. Основи моделювання і конструювання черв'ячних екструдерів: Навч. посіб.-К.:ІВЦ, Видавництво «політехніка», 2002. - 152с.
2. Штефан Е.В., Івашенко Б.П. Проектирование транспортно-прессующих шнековых устройств для дисперсных материалов. Збірник наукових праць НГУ, №21 – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2005. – с.8-12.
3. Штефан Е.В., Блаженко С.І., Івашенко Б.П. Розроблення інформаційної технології проектування шнекових пресів, Харчова промисловість, 2005, № 4, с. 159-162.
4. Штефан Е.В. Моделирование поведения дисперсных систем у нерівноважних процесах харчових виробництв // Наукові праці УДУХТ, №8, 2000, с.63-66.
5. Механика насыщенных пористых сред / Николаевский В.Н., Басинев К.С., Горбунов А.Т., Зотов Г.А.- М.: Недра, 1970.- 339с.
6. Нигматулин Р.И. Методы механики сплошной среды для описания многофазных смесей // ПММ, т.34, №6, 1970. с.1097-1112.