

АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ВІБРОУДАРНОГО ПРЕСУВАННЯ ДИСПЕРСНИХ МАС-ВТОРИННИХ ПРОДУКТІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА

Човнюк Ю.В. к.т.н. доц., Тисленко О.Б. асп.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

У роботі наведені перспективи вдосконалення обладнання та аналізу у задачах розробки процесів формоутворення дисперсних мас-вторинних продуктів сільськогосподарського виробництва. Доводиться, що найбільш ефективним способом формоутворення таких мас є віброударне пресування на інерційних вібропрес-молотах з гідроімпульсним приводом, розглядаються питання його дослідження і, зокрема, можливі режими функціонування (динамічний хаос).

Постановка проблеми. Вібраційному пресуванню заготовок з порошкових матеріалів, дисперсних мас-вторинних продуктів сільськогосподарського виробництва передувало вібраційне ущільнення даних матеріалів, мас, а також інших дисперсних середовищ. Подібність фізико-хімічних властивостей вказаних об'єктів обробки та характеру впливу на них багато в чому обумовило і спільність основних положень теорій відповідних процесів, що надалі доповнювалися і доопрацьовувалися із врахуванням особливостей кожного з них.

Основні положення загальної теорії вібраційного впливу на дисперсні середовища, в тому числі і у разі вібраційного ущільнення порошків, дисперсних мас були сформовані Н.Ф. Гончаревич і К.В. Фроловим, котрі об'єднали реологічну і механічну концепції, описуючи внутрішні процеси взаємодії частинок дисперсної маси, середовища і наповнювача. У роботі [1] авторами запропонований метод механореологічної феноменології, а також спосіб розробки універсальних механореологічних моделей, що часом виступають як єдина система, часом розпадаються на ряд окремих феноменологічних моделей, які описують окремі елементи досліджуваного об'єкта. Складні об'єкти описуються системами складних реологічних і механічних рівнянь, як правило, нелінійних. Механореологічна феноменологія досягається створенням системи логічних умов, на основі яких аналізують процес та визначають моменти переходу від одних характерних станів до інших. Характерна особливість механореологічної феноменології – пристосування методів сучасної реології до опису реальних статистичних за своєю природою процесів, що характеризуються випадковими значеннями параметрів і невідповідними числовими величинами. Наприклад, випадковою твердістю та випадковою в'язкістю і невідповідними числовими величинами у вигляді середніх значень та параметрів-математичним очікуванням, середньою

потужністю, дисперсією, кореляційною функцією і т.і.

Дисперсне середовище/маса, у загальному випадку може бути представлено просторовою багатомасовою, пружновязкопластично-інерційною системою. Кожний реологічний осередок такої системи має інерційні властивості, що характеризуються його масами, пружними властивостями, закладеними у пружних елементах, а також гістерезисними властивостями, що моделюються в'язкими і пластичними елементами. Реологічні осередки взаємодіють через пружні елементи і пари сухого та в'язкого тертя. Автори пропонують, на основі методів еквівалентного моделювання, з використанням стандартних реологічних елементів у разі доповнення їх, за потреби, спеціальними елементами, представляти все різноманіття діючих у реальних системах сил зчеплення між частками еквівалентними в'язкими і сухими опорами.

Можливості механореологічної феноменології дозволяють враховувати всі аспекти поведінки досліджуваного дисперсного середовища під дією вібрацій, однак, як показують самі автори [1] «Труднощі розрахункового характеру обмежують їх практичне використання».

Наведені у роботах [2, 3] аналітичні залежності основних реологічних концепцій теорії вібропресування дисперсних мас, безсумнівно, після відповідної обробки з метою їх спрощення можуть бути використані для створення методики практичних проектних розрахунків параметрів вібраційного навантаження. Однак існуючі реологічні концепції не завжди дозволяють обґрунтовувати ефективність процесу вібраційного пресування дисперсних мас, порошкових матеріалів, особливо у тих випадках, коли величина напруги зсуву менша динамічного зсуву й отже, відсутня текучість матеріалу. Такий стан заготовки/оброблюваної маси характеризується дискретним періодичним досягненням під дією коливальних динамічних впливів кінцевих значень внутрішніх напружень, причому максимальні значення даних напружень не перевищують меж пружності заготовки в цілому. Отже, оцінювання ефективності процесу деформування заготовки, що досягла кінцевих пружних властивостей, з позицій реології є невідповідним, у зв'язку з чим потрібний інший підхід.

Наведений аналіз основних положень механореологічної теорії, реологічних концепцій теорії вібропресування дисперсних мас, їх вібраційного ущільнення показує, що необхідне їх істотне доповнення з метою створення загальної теорії процесу. Незважаючи на відсутність практичних рекомендацій, у наш час достатньо добре розроблено вказану вище реологічну концепцію теорії [2, 3], що ж стосується її механореологічної концепції [1], то вона вимагає конкретного ув'язування фізико-механічних властивостей об'єкту обробки з параметрами зовнішнього вібраційного впливу, розробки науково-методичних рекомендацій для її практичного використання у проектуванні відповідних процесів та обладнання. У плані вирішення зазначених проблем виконано ряд досліджень, результати яких викладені у даній роботі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За ініціативою академіка П.А.Ребіндера розділ механіки, що вивчає вплив вібрацій на різні складні

середовища, у тому числі дисперсні, був названий віброреологією [4]. Відповідно до основних положень віброреології, характер вібрацій визначає величини умовних модулів пружності, коефіцієнтів тертя та в'язкості, (віброреологічних констант), що оцінюють удавану зміну фізичних або механічних властивостей матеріалу середовища за умови є змінності їх «дійсних» значень. З врахуванням віброреологічних концепцій І.І.Биховським [5] була узагальнена та сформульована загальна теорія віброуцільнення дисперсних середовищ. Для оцінювання процесу віброуцільнення автором введено поняття ефективної частоти вібрування суміші із «зернистим наповнювачем», частинки якого контактують безпосередньо між собою, а також з рідиною та пухирцями повітря. Оскільки можливий рух частинки відносно навколишнього середовища відбувається при безпосередньому ковзному контакті з іншими частинками, то у разі щільнішого їх укладання збільшуються сили внутрішнього тертя, а також породжуються сили, обумовлені пластичними властивостями рідкої фази, в'язким опором, пружністю, зчепленням. Ущільнення середовища під дією вібрацій відбувається за рахунок прослизання одних твердих частинок відносно інших під дією зусиль значно менших, ніж при звичайному статичному навантаженні. Дане явище було названо «псевдорозрідженням», а частота, що викликає «псевдорозрідження» - ефективною частотою вібрування, при якій частинки середовища переміщуються одна відносно одної, головним чином за рахунок дії сил власної ваги. Ефективність процесів вібрування сумішей із «зернистим наповнювачем», що при статичному навантаженні з малими швидкостями зрушення мають тільки пластичні або пружно-пластичні властивості, пояснюється трансформуванням пластичного опору при динамічному зсуві у нелінійний в'язкий опір, що залежить від параметрів вібраційного впливу.

У роботі [6] був проведений загальний аналіз відомих рекомендацій з вибору параметрів вібрації і розглянуті питання ефективності застосування різних видів вібрацій (одно частотних і полічастотних), їх спрямованості (вертикальні, горизонтальні, колові), раціонального використання додаткового вантажу і схем його встановлення. Особливий інтерес представляє висновок автора, що для «збільшення інтенсивності вібрацій» і забезпечення тим самим максимальної ефективності ущільнення, необхідно переходити від одно частотних до полі частотних коливань.

Відмічений у ряді робіт [0-0] ефект резонансного ущільнення частинок дисперсних матеріалів/мас тривалий час був об'єктом протиріч. Одні дослідники висували гіпотезу про різні резонансні частоти у частинок різних фракцій [10], інші доводили, що наявність частоти резонансних коливань у частинок одного розміру заздалегідь забезпечує ефективні коливання частинок інших розмірів [5]. Найобґрунтованішим можна вважати висновок [11], зроблений у результаті вивчення залежностей абсолютної та відносної деформації циліндричних зразків із сумішей дисперсних матеріалів від пружних властивостей самого матеріалу при статичному та динамічному зовнішньому впливі. У даних дослідженнях встановлено, що частота зовнішнього силового впливу має знаходитись у безпосередньому зв'язку з

власною частотою зразка, що представляє собою дисперсне середовище твердих частинок з наповнювачами, розміщене у замкненому об'ємі прес-форми, а ущільнення цього середовища найефективніше відбувається при збігу частот зовнішнього силового впливу з власною частотою об'єкта, яка у процесі ущільнення суміші може змінюватися і досягати кінцевого значення для заданої величини зовнішнього динамічного силового впливу. Компенсацію приросту власної частоти об'єкта у процесі його ущільнення можна забезпечити циклічною зміною частоти зовнішніх збурень в області резонансу [8].

Загальний підхід до оцінювання резонансного ефекту ущільнення, заснований на механічних концепціях, що взяті для матеріалів, у яких реологічні властивості виражені слабо, або ж відсутні взагалі. З даних позицій можна розглядати процес формоутворення заготовок з дисперсних матеріалів без наповнювача або ж з малим його вмістом, частинки основи яких непластичні, а сам матеріал знаходиться у прес-формі, навантажений постійним зусиллям статичного притискання і піддається зовнішньому вібраційному впливу із заданою резонансною частотою.

Основні положення резонансно-структурної теорії процесів віброударного пресування дисперсних мас при інерційному навантаженні викладені у [12].

На думку автора вказаної роботи заготовка у вказаному об'єкті прес-форм в загальному випадку представляє собою складну систему структурних утворень, що складаються з простих окремих твердих частинок з n ступенями вільності. Коливальні рухи в складній системі описуються n координатами, вибір яких довільний, а число ступенів вільності визначається мінімальним числом змінних, що описують рух простих систем. Можливі переміщення в складній системі визначаються відносним впливом простих систем одна на одну. Фактичний рух частинок основи порошкової заготовки/дисперсної маси є «зв'язаним», тобто коливання в будь-якій з простих систем впливають на коливання в іншій і навпаки.

Для фізичного аналізу коливальних явищ в складній системі заготовки необхідно знати характер коливань в окремих простих, як їх прийнятно називати, «парціальних» системах, з яких вона складається [12]. З цією метою слід визначити: «парціальні» системи, що утворюють складну систему; встановити «зв'язок»-взаємодію між коливаннями у «парціальних» системах; оцінити величину даного «зв'язку» за ступенем його впливу на характер коливань. На відміну від підходу [12] у даній роботі використані результати досліджень [14].

Мета роботи полягає у встановленні основних закономірностей руху та його кінематичних характеристик для «зв'язаних» ланцюгів частинок дисперсної маси за допомогою методу відображень Пуанкаре та структурних перетворень, появи динамічного хаосу у одновимірних ланцюгах вказаних систем (типові моделі дисперсних мас при їх ущільненні та вібраційній/віброударній обробці).

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.

Рівновага «зв'язаного» ланцюга частинок дисперсної маси.

Розглянемо одновимірний ланцюг частинок дисперсної маси, котрі знаходяться у деякому зовнішньому (силовому) полі і, крім того, взаємодіють з найближчими сусідами. Гамільтоніан такої системи може бути записаний у вигляді:

$$H = \frac{1}{2m} \cdot \sum_k p_k^2 + \frac{1}{2} \cdot \sum_k [\Theta(U_{k+1} - U_k) - \Theta(U_k - U_{k-1})] + \sum_k V(U_k), \quad (1)$$

де: (U_k, p_k) – координата та імпульс k -ої часточки масою m $p_k = m \cdot \dot{U}_k$;

Θ – потенціал парної взаємодії часточок, який залежить від їхньої взаємної відстані;

$V(U_k)$ – потенціал зовнішнього силового поля, який зазвичай є періодичним з деяким періодом a_0 ;

$$V(U_k + a_0) = V(U_k). \quad (2)$$

Розглянемо умову стаціонарності часточок:

$$\dot{U}_k \equiv \frac{dU_k}{dt} = \frac{\partial H}{\partial p_k} = 0, \quad \dot{p}_k \equiv \frac{dp_k}{dU_k} = -\frac{\partial H}{\partial U_k} = 0, \quad (3)$$

де: t – час;

Перше рівняння у (3) означає просто відсутність руху часточок у стаціонарному стані; друге після підстановки H з (1) дає рівняння:

$$\frac{d\Theta(U_{k+1} - U_k)}{dU_k} + \frac{d\Theta(U_k - U_{k-1})}{dU_k} + 2 \cdot \frac{dV(U_k)}{dU_k} = 0, \quad (4)$$

котре визначає рівновагу часточок дисперсної маси.

Введемо нову змінну $I_k = U_k - U_{k-1}$ і з її допомогою подамо скінченно-різницеве рівняння (4) у вигляді відображення:

$$\begin{cases} I_{k+1} = -\{\Theta' \cdot [-\Theta'(I_k) - 2V'(U_k)]\}^{-1} \\ U_{k+1} = U_k + I_{k+1}. \end{cases} \quad (5)$$

Тут штрих означає диференціювання по аргументу й $(\Theta')^{-1}$ є функція, обернена до Θ'

Нехай, наприклад, $\Theta(\xi) = \frac{1}{2} w_0^2 \cdot \xi^2$ (часточки зв'язані лінійними пружними пружинами). Тоді: $\Theta'(\xi) = w_0^2 \cdot \xi$,

$$\left\{ \Theta'(\xi) \right\}^{-1} = \frac{\xi}{w_0^2}.$$

Використовуючи ці вирази, перетворюємо (5) у наступне відображення:

$$I_{k+1} = I_k + V'(U_k), U_{k+1} = U_k + I_{k+1}, \quad (6)$$

котре визначає рівноважні положення часточок ланцюга. У цій задачі немає часу. Індекс k визначає просторове положення часток. І все ж таки задача звелась до відображення (6), яке у подальшому буде використане.

Ми обговоримо задачу про ланцюг часточок дисперсної маси у другій частині даної роботи.

Відомо [14], що далеко не всякому відображенню можна поставити у відповідність еквівалентне диференціальне рівняння. У данному випадку це легко зробити. Розглянемо гамільтоніан:

$$H = H(I, U) = \frac{1}{2} \cdot I^2 - V(U) \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(x - na), \quad (7)$$

де: $\delta(x)$ – дельта-функція П.Дірака;

а роль часу відіграє координата x і точці $x_n = na$ відповідає незбурене положення часточок у ланцюгу. Вираз (7) породжує наступні рівняння руху:

$$\begin{cases} \frac{dI}{dx} = -\frac{\partial H}{\partial U} = V'(u) \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(x - na), \\ \frac{du}{dx} = \frac{\partial H}{\partial I} = I. \end{cases} \quad (8)$$

Щоб отримати з (8) відображення, слід діяти наступним чином. Зазначимо, що між точками $x_n = na$ відбувається незбурений рух системи: $\frac{dI}{dx} = 0, \frac{dU}{dx} = I$, котрий представляє собою вільне «обертання» з «частотою» $w(I) = I$, тобто:

$$I = \text{const}, \quad U = Ix + \text{const}. \quad (9)$$

Розв'язок у формі (9) справедливий на будь-якому інтервалі $(na, (n+1)a)$. Значення I та U на сусідніх інтервалах можна зшити. Умови зшивання й визначають вид відображення \hat{T} . Для цього визначимо:

$$I_n \equiv I(x = na - 0), U_n \equiv U(x = na - 0).$$

Відповідно:

$$I_{n+1} \equiv I(x = (n+1)a - 0), U_{n+1} \equiv U(x = (n+1)a - 0).$$

Проінтегруємо (8) у малому околі x : $(na-0, na+0)$. Отримаємо:

$$I_{n+1} - I_n = V'(U_n), \quad (10)$$

де ми використали формули (9) й те, що U неперервне у точці $x_n = na$: $U(na-0) = U(na+0)$. В області $x: (na+0), (n+1)a-0$ має місце вільне обертання (9). Тому:

$$\begin{cases} I((n+1)a - 0) = I(na + 0) = I_{n+1}, \\ U((n+1)a - 0) = U(na + 0) + I_{n+1} \cdot a = U_n + a \cdot I_{n+1}. \end{cases} \quad (11)$$

Суміщуючи (10) та (11), отримаємо остаточно відображення:

$$I_{n+1} = I_n + V'(U_n), U_{n+1} = U_n + a \cdot I_{n+1} \quad (12)$$

Котре співпадає з (6), якщо покласти $a=1$.

Отже, можна співставити ітеграційному процесу деяку конкретну динамічну систему (7),(8), у котрій відображення виникає у результаті дії періодичної послідовності поштовхів типу δ -функцій.

Певні питання краще розглядати, використовуючи рівняння (8), а не відображення (12). Розміщення часточок дисперсної маси вповдовж однієї координати дозволяє надати цій координаті змісту «часу». Технічна реалізація цієї операції буде видна нижче. У багатовимірному випадку подібна можливість, взагалі кажучи, відсутня.

Висновки

1. Дослідження динаміки нелінійної системи [14] показують, що у залежності від характеру й величини взаємодій система може проходити через низку біфуркацій, які проявляють себе у зміні різноманітних видів руху. При певних умовах практично в усіх динамічних системах з числом ступенів вільності руху $N > 1,5$ існує область у фазовому просторі й у просторі параметрів, де рух є хаотичним.
2. Нехай гамільтоніан системи з N взаємодіючих часток дисперсної маси $H = H(p_1, q_1; p_2, q_2; \dots; p_N, q_N)$ є гамільтоніаном системи з N степенями вільності руху. Рівняння руху мають вид:

$$\dot{p}_k = -\frac{\partial H}{\partial q_k}, \dot{q}_k = \frac{\partial H}{\partial p_k}, (k = 1, 2, \dots, N), \quad (13)$$

а умови рівноваги можна отримати звідси, якщо покласти рівними нулю похідні \dot{p}_k \dot{q}_k :

$$\frac{\partial H}{\partial q_k} = 0, \frac{\partial H}{\partial p_k} = 0, (k = 1, 2, \dots, N), \quad (14)$$

3. Відомо [14], що у системі (13) існують біфуркації, нелінійний резонанс та динамічний хаос. Такі ж явища можливі й у системі (14), однак тепер це будуть переходи від однієї структури до іншої структури (дисперсної маси), котра, у свою чергу, може бути також хаотичною, або нерегулярною.

Список використаних джерел

1. Гончарович И.Ф. Теория вибрационной техники и технологиит / И.Ф. Гончарович, К.В. Фролов – М.: Наука, 1981. – 320 с.
2. Реологические основы виброуплотнения упруго-вязко-пластических сред [Ям В.М., Солодовник А.Б., Иохансон Р.Д. и др.] // Производство огнеупоров. – 1975. - №4(47). – С. 102 – 115.

3. Реологические основы виброуплотнения упруго-вязко-пластических сред [Ям В.М., Солодовник А.Б., Иохансон Р.Д. и др] // Производство огнеупоров. – 1975. - №5(48). – С. 75 - 87.
4. Вибрация в технике: Справочник т.2. Колебания нелинейных механических систем / под ред. Н.И.Блехмана. / Ред.совет: В.Н.Челомей (пред). – М.: Машиностроение, 1979. — 351с.
5. Быховский И.И. Основы теории вибрационной техники / И.И. Быховский – М.: Машиностроение, 1969. – 364с.
6. Шмигальский В.Н. Формирование изделий на виброплощадках / В.Н.Шмигальский– М.: Стройиздат, 1968. – 104с.
7. Ayer G.E Vibratory compaction: Part 1. Compaction Spherical Shapes, Argonne National Laboratory, 111/z. Ceram./ Ayer G.E., Soppet F.E. - SOC. – 1965. – Vol.48, №4. – P. 180 - 185.
8. Evans P.E Vibratory packing Power / Evans P.E., Millman R.S. // Power Metallurgy. – 1964. – Vol.7, №13. – P. 50-60.
9. Hauth I.I. Atomic Energy Comission Report: Vibrationally Compacted Ceramic Fuels // Hauth I.I.; – HW67777. –1961. – 44 p.
10. Лермит Р. Проблемы технологии бетона // Р.Лермит– М.: Гос.издат. лит-ры по ст-ву, архитектуре и строит.матер., 1959. – 294с.

Аннотация

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ВИБРОУДАРНОГО ПРЕССОВАНИЯ ДИСПЕРСНЫХ МАС-ВТОРИННЫХ ПРОДУКТОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Човнюк Ю.В., Тисленко А.Б.

В работе приведены перспективы усовершенствования оборудования и анализа в задачах разработки процессов формообразования дисперсных масс-вторичных продуктов сельскохозяйственного производства. Доказано, что наиболее эффективным способом формообразования таких масс является виброударное прессование на инерционных вибропресс-молотах с гидроимпульсным приводом, рассмотрены вопросы его исследования и, в частности, возможные режимы функционирования (динамический хаос).

Abstract

ANALYSIS FOR VIBROIMPACT PRESSING OF DISPERSIVE MASSES – SECONDARY PRODUCTS OF THE AGRICULTURAL PRODUCTION

Y. Chovnyuk, A. Tyslenko

Improvements perspectives of equipment and processes analysis for the problems of dispersive masses forming-secondary products of the agricultural production are discussed. It is proved that the effective forming method of such masses is the vibroimpact pressing by the inertial vibropress-hammers with a hydroimpulsive drive.