

**МОДЕЛЮВАННЯ ПОЧАТКОВОГО ЕТАПУ ПРОЦЕСУ ВІБРАЦІЙНОГО
УЩІЛЬНЕННЯ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ**

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В роботі описано процес зневоднення вологих органічних відходів, що складається із трьох основних етапів. Для полегшення виконання математичного аналізу запропоновано спрощену структуру середовища, яке буде піддаватися ущільненню. Також, розглянута математична модель одного із етапів складного процесу зневоднення вологих органічних відходів, що реалізується шляхом вібраційного ущільнення.

Ключові слова: вібраційне пресування, моделювання, вібраційне ущільнення, нелінійна модель, пористість матеріалу.

Abstract

The paper presents the process of dehydration of wet organic waste, which consists of three main stages. To facilitate the performance of mathematical analysis, a simplified structure of the medium that will be subjected to compaction is proposed. Also, the mathematical model of one of the stages of the complex process of dehydration of wet organic waste, which is realized by vibration compaction, is considered.

Keywords: vibration pressing, modeling, vibration compaction, nonlinear model, porosity of material.

Вступ

На сучасному етапі розвитку сільського господарства та харчової промисловості все гостріше постає питання подальшої переробки, або утилізації різного виду органічних відходів із високим вмістом рідини. Зневоднений продукт може використовуватися як сировина для інших галузей промисловості, або ж як корм тваринам, що в свою чергу, підвищує безвідходність виробництва, а отже і його прибутковість.

Процес зневоднення органічних матеріалів може відбуватися різними методами, одним із найдешевших та найменш енергозатратним вважається процес механічного зневоднення, який реалізується за рахунок ущільнення.

Для інтенсифікації протікання різноманітних технологічних процесів, в тому числі і ущільнення, досить широко застосовують зовнішнє вібраційне навантаження, [1,2].

Результати дослідження

Для теоретичного обґрунтування робочих режимів вібраційного пресового обладнання, яке буде використовуватися для вібраційного ущільнення (видалення вологи) із органічних відходів різного виду (рослинний жмих, кавовий шлам, пивна дробина тощо), [2,3] необхідно створити математичну модель цього процесу.

На початку нам потрібно прийняти, як типову, слідує структуру середовища, яке буде піддаватися вібраційному ущільненню. Органічні відходи мають бути подрібненими до фракції 2...5 мм. Будемо вважати, що ці частинки являють собою «каркас» в «порах» якого буде утримуватися рідина (яку потрібно видалити) та невелика кількість повітря. Відсотковий вміст рідини у органічній масі залежить від типу рослинних культур, які піддаються подальшому вібраційному ущільненню та їх попередньої технологічної обробки.

В процесі ущільнення органічний «каркас» буде проявляти реологічні властивості та буде спресовуванню, паралельно із цим, буде мати місце процес фільтрування рідини через шар «каркасу». Ефективність цих сукупних процесів безпосередньо залежить від попередньої обробки (наприклад термічної та вологотермічної) та робочих параметрів технологічного процесу пресування.

При математичному моделюванні процесу фільтрації, рідину доцільно представляти як нестисливу ньютонівську рідину з відносно низькою в'язкістю, а «каркас» вважається нерухомим та його пористість в зоні процесу вібраційного ущільнення – постійною.

На практиці ж, в процесі пресування може відбуватися переміщення «каркасу» і рідини та особливо зміна пористості органічного матеріалу. Адже пористість буде зменшуватися до моменту коли стиснений «каркас» не зрівноважить власним опором дію зовнішнього навантаження. Тоді в спресованому матеріалі повний тиск буде представляє собою суму нейтрального та ефективного

тиску, який є сумою статичного тиску та змінного в часі тиску, який створюється вібраційним навантаженням.

На нашу думку, пористість матеріалу доцільно визначати коефіцієнтом пористості:

$$\xi = \frac{V_n}{V_{m.ф.}}, \quad (1)$$

де V_n – об'єм пор матеріалу;
 $V_{m.ф.}$ – об'єм твердої фази.

В ідеальному випадку можна допустити, що об'єм твердої фази дорівнює об'єму матеріалу після закінчення процесу пресування (тобто дорівнює об'єму сухої частки), тоді об'єм пор в кінцевому об'ємі буде становити: $V_{n.к.} = V_k - V_n$ (де V_k – об'єм мезги в кінцевому обсязі прес-форми).

Також варто врахувати, що об'єм пор

$$V_n = V_{ол.} + V_{нов.}$$

де $V_{ол.}$ – об'єм повітря, який вільно знаходиться в матеріалі та частково в порах «каркасу»;
 $V_{нов.}$ – об'єм який займає рідина в порах «каркасу».

Припустимо, що рідина в порах «каркасу» не буде чинити опір деформаціям зсуву, в результаті чого в ній діятиме лише гідродинамічний тиск. Також, для полегшення розрахунків будемо прощення вважати, що тиск рідини в порах не буде створює в «каркасі» якихось додаткових деформацій, [3,4].

На етапі, коли матеріал насичений рідиною, співвідношення фаз буде визначатися за допомогою коефіцієнта пористості ξ .

Процес видалення частинок повітря, які вільно знаходяться в матеріалі, – не вимагає великого значення тиску, який досягається пресовим обладнанням під час ущільнення матеріалу, адже ці частинки мають без перешкод видалятися в атмосферу (тиск якої значно менший). Об'ємне співвідношення вільного повітря та рідини має визначатися експериментально.

На нашу думку, процес вібраційного ущільнення органічних відходів можна поділити на три наступних етапи:

- I – відбувається ущільнення матеріалу під дією вібраційного та статичного навантаження (виділення рідини є дуже малим та ним знехтуємо);
- II – здійснюється процес інтенсивного видалення вільної рідини та рідини із пор внаслідок руйнування «каркасу»;
- III – щільність спресованого середовища фактично перестає зростати (досягнувши межі близько 90% від теоретично можливої щільності), процес подальшого вібраційного пресування та видалення рідини зупиняється.

Представимо процес вібраційного ущільнення на *першому етапі* за допомогою нелінійної моделі, яка представлена на рис. 1.

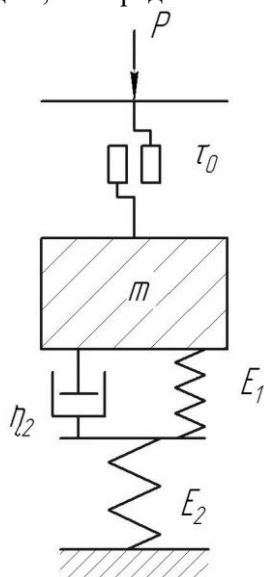


Рис. 1 – Нелінійна реологічна модель елементарного об'єму матеріалу

Ця модель містить елементи Гука E_1 та E_2 , Ньютона η_2 , Сен-Венана τ_0 та елемент m із інерційними властивостями. За допомогою двох останніх елементів можна відносно точно змоделювати особливості протікання ідеалізованого процесу ущільнення органічного середовища під дією вібрації.

В розглянутій моделі елементи Гука будуть представляти пружність «каркасу» матеріалу, «в'язкі» елементи – стискання частинок повітря та переміщення рідини в порах. Елемент Сен-Венана характеризуватиме сухе (кулонівське) тертя, яке має місце між частинками середовища при їх взаємному ковзанні. За допомогою маси m будемо описувати інерційні властивості середовища. Ці властивості мають високе значення під час дії динамічних навантажень, які обов'язково матимуть місце в процесі дії вібраційного навантаження.

Для розв'язання певних окремих випадків є допустимою лінеаризація нелінійних характеристик елемента Сен-Венана, в результаті чого, його можна замінити елементом Ньютона з умовним динамічним коефіцієнтом в'язкості η_1 .

Розглянемо спрощену нелінійну модель (рис. 1) одночасної дії вібраційного навантаження та статичного тиску на елемент m . Сумарний вплив можна описати за законом:

$$p = p_c + p_A \sin(\omega t), \quad (2)$$

p_c – значення статичного тиску;

p_A – амплітудне значення тиску вібраційного навантаження;

ω – кутова частота вібрації.

В момент, коли інтенсивність вібраційного навантаження досягне деякої межі $ma\omega^2 + \varepsilon_1 E_1 > \tau_0$ та буде виконуватися умова $p + p_A > \tau_0$, в елементі Сен-Венана почнеться значне проковзування пластинок та їх відносний рух із швидкістю:

$$v = v + A\omega \cos(\omega t),$$

де A , ω – амплітуда та частота вібрацій;

v – швидкість поступального руху (для спрощення розрахунків можна прийняти постійною).

Опір в елементі Сен-Венана є силою сухого тертя $\tau = \tau_0 \text{sign} v$ (де v – ейлерова координата).

В умовах дії вібраційного навантаження відбувається згладжування характеристики сухого тертя (має місце трансформація сухого тертя у в'язке). Тоді можна записати:

$$\tau = \tau_0 \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{v}{A\omega}, \quad (3)$$

Рівняння (3) можна наближено записати у формі:

$$\tau = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\tau_0}{A\omega} \cdot v.$$

Аналізуючи цей вираз можна чітко відслідкувати те, що елемент Сен-Венана перетворюється в умовах дії вібрації в елемент Ньютона, адже опір залежить від швидкості v .

Також, потрібно зауважити, що зазначений ефект може мати місце лише при виконанні умови: $\frac{v}{A\omega} < 1$. Елемента Ньютона можна описати співвідношенням: $\tau = \eta_1 \frac{d\varepsilon_1}{dt}$. Для збереження одиниць

вимірювання будемо вважати, що: $\eta_1 = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\tau_0}{\omega}$; $\frac{d\varepsilon_1}{dt} = \frac{v}{A}$.

Отже, елемент сухого тертя в умовах дії вібраційного навантаження перетворюється в елемент Ньютона з коефіцієнтом динамічної в'язкості η_1 , який прямо залежить від частоти вібрації ω .

Враховуючи вищевикладене реологічна модель (рис.1) (по відношенню до дії усереднених сил) трансформується в модель Бюргерса [4], для якої рівняння визначення деформацій у шарі відоме та буде мати наступний вигляд:

$$\varepsilon = p \left\{ \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \left[1 - \exp \left(-\frac{E_2 t}{\eta_2} \right) \right] + \frac{t}{\eta_1} \right\}. \quad (4)$$

В рівняння (4) підставимо значення η_1 та отримаємо:

$$\varepsilon = p \left\{ \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \left[1 - \exp \left(-\frac{E_2 t}{\eta_2} \right) \right] + \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\omega t}{\tau_0} \right\}.$$

Порівнюючи вищевикладені вирази, можна зробити висновок, що доданок $\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\omega t}{\tau_0} \cdot p = \Delta \varepsilon$ є приростом деформації, яка викликана дією вібраційного навантаження.

Аналізуючи рівняння (4) можна зробити висновок, що у певний початковий момент $t = 0$ накладання постійного статичного навантаження (тиску p_c) середовище отримує миттєву деформацію

величиною ε_0 . Після чого деформація наростає до певного максимального значення. В наступні моменти часу ($t > 0$) систему можна характеризувати динамічною в'язкістю, яка безпосередньо визначається коефіцієнтом η та за рахунок збільшення другого доданку рівняння (4) збільшується загальна деформація системи ε (тобто за рахунок дії вібраційного навантаження).

Висновки

В роботі було запропоновано варіант описання процесу зневоднення вологих органічних відходів, що складається із трьох основних етапів. Для полегшення виконання математичного аналізу та спрощення математичної моделі процесу ущільнення, запропоновано спрощену структуру середовища, яке буде піддаватися ущільненню. Таке усереднене середовище має складатися із твердих частинок, які будуть утворювати певний «каркас» в «порах» якого утримується рідина, яка підлягає видаленню та невелика кількість повітря. Також, розглянута математична модель одного із етапів складного процесу зневоднення вологих органічних відходів, інтенсифікація якого реалізується шляхом накладання вібраційного навантаження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Назаренко І. І. Прикладні задачі теорії вібраційних систем: Навч. посібник / І. І. Назаренко. – К.: ІСДО, 1993. – 216 с. – Рос. мовою.
2. Sevost'janov I. V. Processy i oborudovanie dlja vibroudarnogo razdelenija pishhevyyh othodov [Tekst]: monografiya / I. V. Sevost'janov. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 417 p.
3. Fučík R., Mikyška J. Discontinuous Galerkin and Mixed-Hybrid Finite Element Approach to Two-Phase Flow in Heterogeneous Porous Media with Different Capillary Pressure. *Procedia Computer Science*, 2011, vol. 4, pp. 908-917. doi: 10.1016/j.procs.2011.04.096
4. Asgari A., Bagheripour M.H., Mollazadeh M. A generalized analytical solution for a nonlinear infiltration equation using the exp-function method // *Scientia Iranica*. – 2011. – Vol. 18. – Iss. 1. – P. 28–35. doi: 10.1016/j.scient.2011.03.004;

Манжілевський Олександр Дмитрович — кандидат технічних наук, Вінницький національний технічний університет, доцент кафедри галузевого машинобудування, e-mail: manzhilevskyy@gmail.com, тел. +380961742288, Україна, 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, кімн. 1204.

Іскович-Лотоцький Ростислав Дмитрович — докт. техн. наук, професор кафедри теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет, e-mail: islord@vntu.edu.ua, Україна, 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, кімн. 1212

Manzhilevskyy Alexander D. — Candidate of Science (Engineering), Vinnytsia National Technical University, the Associate Professor of the Chair of sectoral mechanical engineering, e-mail: manzhilevskyy@gmail.com, tel. +380961742288 Ukraine, 21021, Vinnytsia, Khmelnytsky Highway st. 95, apt. 1204.

Iskovych-Lototskii Rostyslav D. — Doctor of Engineering, professor of Industrial Engineering Department, Vinnytsia national technical university, Vinnytsia, e-mail: islord@vntu.edu.ua, Ukraine, 21021, Vinnytsia, Khmelnytsky Highway st. 95, apt. 1212.
