

УДК 621.9:664

## ВПЛИВ ВІБРАЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ПРОЦЕС ЗНЕВОДНЕННЯ ЖОМУ ЦУКРОВОГО БУРЯКА

*Іскович-Лотоцький Р.Д.*

*Поліщук О.В.*

*Репінський С.В.*

*Слабкий А.В.*

*Вінницький національний технічний університет*

*В статті проаналізовано процеси вібраційного зневоднення жому цукрового буряка на основі представлення його структури у вигляді двофазного середовища з перехідно-пористою структурою та запропоновано ідеалізовану модель, що дозволяє дослідити зміну інтенсивності цих процесів в різних режимах.*

*In the article the processes of oscillation dehydration of bagasse of sugar beet are analysed on the basis of presentation of his structure as a diphasic environment from transitional-porous by a structure and an idealizing model is offered, that allows to probe the change of intensity of these processes in the different modes.*

### **Вступ**

На сьогоднішній день вібраційні технології дедалі ширше використовуються в технологічних процесах виробництва, оскільки використання вібраційного навантаження дозволяє підвищити продуктивність обладнання, скоротити виробничий цикл і покращити якість готового продукту [1].

У промисловості та сільському господарстві вібраційна техніка використовується для інтенсифікації таких процесів, як транспортування і дозування матеріалів, розділення сумішей на фракції, подрібнення і ущільнення, фільтрування, гранулювання, формування, сушіння, тощо [2,3,4,5,6]. Значні внески в розвиток вібраційних технологій та їх використання в харчовому виробництві належать П.С. Бернику, Р.Д. Ісковичу-Лотоцькому, Г.А. Хайлісу, І.П. Паламарчуку.

Вібраційний вплив на оброблювані матеріали та середовища легко піддається регулюванню завдяки зміні частоти та амплітуди коливань, що дозволяє легко забезпечити його найбільш ефективні режими [1].

У харчовій промисловості вібраційні технології використовуються під час транспортування, проціджування та одночасної механічної очистки спиртових, хлібопекарських, пивних, кормових та ін. дріжджів [1,2]; у технологічних процесах виготовлення сухого молока для його сушіння та відсіювання [5]; під час сортування ягід для швидкої заморозки [6]; в процесах розморожування риби та інших морепродуктів [1,6] тощо.

Відомі також роботи, присвячені застосуванню вібраційних технологій в цукровому виробництві. Так в роботі [6] йдеться про інтенсифікацію процесу кристалізації цукру завдяки підвищенню процесу тепловіддачі, швидкість якого в різних частотних режимах зростає від 2,5 до 9 разів. У роботі [7] згадується про зміни реологічних властивостей жому цукрового буряка під час накладання динамічних навантажень, що полягають у зменшенні його в'язкості з підвищенням швидкості зсуву частинок в середовищі жому цукрового буряка, що, відповідно, сприяє збільшенню швидкості переміщення води в ньому.

Прикладом нецілеспрямованого використання вібраційного навантаження для зневоднення рослинної маси є процес її транспортування автотранспортом до кінцевого споживача. Під час перевезення рослинна маса піддається постійному стрясанню. Цей процес можна розділити на два етапи: імпульсний вплив з боку кузова автомобіля і інерційний вплив, що зумовлений силою власного тяжіння під час повернення у вихідне положення. Результатом цього процесу є суттєве зниження вологості рослинної маси, яку отримує споживач. Але зневоднення таким чином має і свої недоліки, а саме: по-перше, споживач купує вторинний продукт високої вологості, витрачаючи кошти і на воду, яка втрачається під час перевезення, а по-друге, вода, яка видалається під час транспортування, забруднює навколишнє середовище, оскільки містить у собі органічні кислоти, білки та інші сполуки.

### *Постановка завдання*

Одним із продуктів, що піддається вищенаведеному впливу є жом цукрового буряка. Міцність цього рослинного матеріалу є досить незначною, що визначає його високу схильність до деформацій розтягу-стиску, зсуву, кручення, поперечного та повздовжнього згину під впливом зовнішніх силових факторів. Жому також властива значна рухомість, ця та перераховані вище властивості жому цукрового буряка визначають його значну податливість під час механічної переробки і, відповідно, сприяють процесу видалення вологи, сконцентрованої в ньому [8,9].

Для забезпечення максимальної ефективності процесів вібраційного зневоднення жому цукрового буряка необхідно визначити характер утримання води в його структурі, а також дослідити вплив різних видів та режимів навантаження на процес її видалення.

### *Результати*

Сирий жом цукрового буряка є двофазним середовищем, однією з фаз якого є вода, а другою – рослинні волокна цукрового буряка. Його також можна розглянути як пористе середовище, заповнене водою [8].

Враховуючи, що скелет пористого середовища стиснутого жому складається з рослинних волокон хаотично розташованої стружки цукрового буряка, величина поперечного перерізу якої змінюється в досить вузькому діапазоні, в той час як довжина стружки може значно відрізнятись, величина його проникності може змінюватись в досить широких межах у середині певного обмеженого об'єму, що дозволяє вважати це середовище перехідно-пористим, і говорити про однорідність такого середовища в межах робочого об'єму досить складно. Але така різка неоднорідність середовища дає усереднений ефект, що дозволяє припустити його постійність в межах конкретно взятого об'єму, як і для більшості пористих середовищ (за припущення, що розміри стружки буряка значно менші розмірів робочого об'єму) [10].

Процес зневоднення жому цукрового буряка відбувається завдяки ущільненню його структури під дією рухомих частин обладнання для зневоднення та супроводжується зменшенням вихідного об'єму матеріалу, що спричинене видаленням з останнього води. Зменшення частки об'єму, що зайнятий волокнистими тканинами рослинного скелету, відбувається переважно завдяки їх ущільненню і пластичній деформації (як показує практика втрати сухих речовин під час зневоднення жому механічними способами складають не

більше 1-2% їх загальної кількості [11]), а зменшення частки об'єму, зайнятого рідкою фазою (водою), відбувається завдяки її видаленню з об'єму матеріалу, що зневоднюється, (враховуючи значення модуля пружності води, можна припустити її недеформованість під дією робочих навантажень). Той факт, що вміст сухих речовин у сирому жомі цукрового буряка складає 6-9%, дозволяє припустити, що пластична деформація волокнистих тканин матеріалу також відбувається завдяки зменшенню їх пористості, а точніше – виведення капілярно утримуваної вологи. Тому процес зневоднення жому цукрового буряка можна розглядати як процес, ідентичний процесу течії води в пористому середовищі зі змінною пористістю.

Для описання характеру та визначення параметрів руху води під час її видалення з жому цукрового буряка на макроскопічному рівні можна припустити, що елементи об'єму, до яких віднесено тиск і швидкість руху води, вміщують велику кількість пор середовища, внаслідок чого динамічні змінні процесу (швидкість течії, тиск в середовищі, тощо) фактично усереднені у ньому. Отже, пористе середовище та рідина у замкненому об'ємі мають неперервний однорідний розподіл і поширення збурення (зміна тиску) в ньому буде однаковим зі зміною такого в безперервному середовищі [10].

Під час процесу зневоднення жом переважно виявляє пластичні та в'язкі властивості. Пружні властивості жому виявляються зі зменшенням вмісту води і, відповідно, не матимуть значного впливу на поширення імпульсів тиску в його середовищі на початкових стадіях процесу.

Зміна тиску в пористому середовищі матеріалу під час вібраційного навантаження відбуватиметься циклічно у відповідності з циклом зміни тиску в робочій порожнині вібраційної ланки і її ходу (рис. 2.1), а отже, середній тиск на зовнішній межі пористого середовища складатиме

$$p_{\text{сеп}} = p_{\text{min}} + \frac{(p_{\text{max}} - p_{\text{min}})(t_{\text{н.т}} + t_{\text{п.т}})}{2T}, \quad (1)$$

де  $t_{\text{н.т}}$ ,  $t_{\text{п.т}}$  – час зростання і падіння тиску в середовищі;  $T$  – період циклу спрацювання вібраційної ланки;  $p_{\text{min}}$ ,  $p_{\text{max}}$  – мінімальний і максимальний тиски в середовищі.

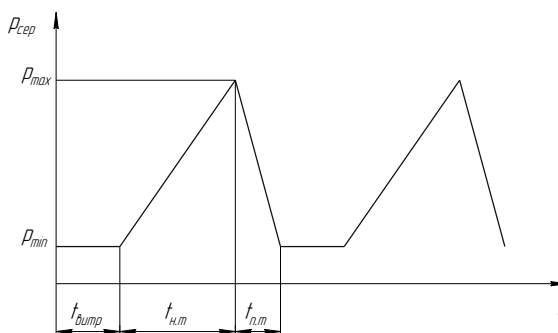


Рис. 1. Зміна тиску на межі середовища жому, що зневоднюється

У випадку зневоднення матеріалу накладанням постійного навантаження права частина рівняння (1) міститиме лише один доданок  $p_{\text{min}}$ . Враховуючи різницю середніх тисків в середовищі під час зневоднення жому цукрового буряка різними способами та особливості руху рідини в пористому середовищі за змінних навантажень, можна припустити, що вібраційний спосіб зневоднення є більш ефективним у порівнянні зі способом зневоднення шляхом накладання постійного навантаження.

Згідно відомого закону Дарсі [12] макроскопічна швидкість води в пористому середовищі залежить від градієнта тиску, що впливає на рідину. Отож, можна сказати, що під час зневоднення способом статичного навантаження, рух і виділення води відбуватиметься інтенсивно лише на зовнішніх границях середовища – біля дренажних отворів робочого об'єму, а в загальній масі матеріалу рух води відбуватиметься винятково за рахунок її перерозподілу між елементарними об'ємами, тобто заповнення та спустошення сусідніх пор і капілярів матеріалу.

Пористість  $f$  матеріалу визначається за відомою залежністю [9,12]

$$f = 1 - \frac{V_{cp}}{V_{\Sigma}}, \quad (2)$$

де  $V_{cp}$  – об'ємна частка жому, що вміщує сухі речовини та хімічно і фізико-хімічно зв'язану воду;  $V_{\Sigma}$  – загальний об'єм жому.

Відповідно об'ємна частка механічно зв'язаної води  $V_{MB}$  в жомі визначається за простою формулою

$$V_{MB} = V_{\Sigma} - V_{cp}. \quad (3)$$

Масова частка зв'язаної механічно води в сирому жомі складає  $\approx 65\%$ , фізико-хімічно зв'язаної  $\approx 15\%$ , а сухих речовин  $\approx 9\%$  [8,11]. Тоді маса сухих речовин  $m_{cp}$  у сирому жомі за умови максимального їх вмісту становитиме  $m_{cp}=0,09m_{\Sigma}$ , і, відповідно, механічно зв'язаної води –  $m_B=0,65m_{\Sigma}$ , фізико-хімічно зв'язаної –  $m_B=0,15m_{\Sigma}$ . З формул визначення густини та останніх співвідношень можна записати, що пористість жому складатиме

$$f = 1 - \frac{\frac{m_{cp}}{\rho_{cp}}}{\frac{m_B}{\rho_B} + \frac{m_{cp}}{\rho_{cp}}}, \quad (4)$$

де  $\rho_{cp}$  – густина сухої речовини.

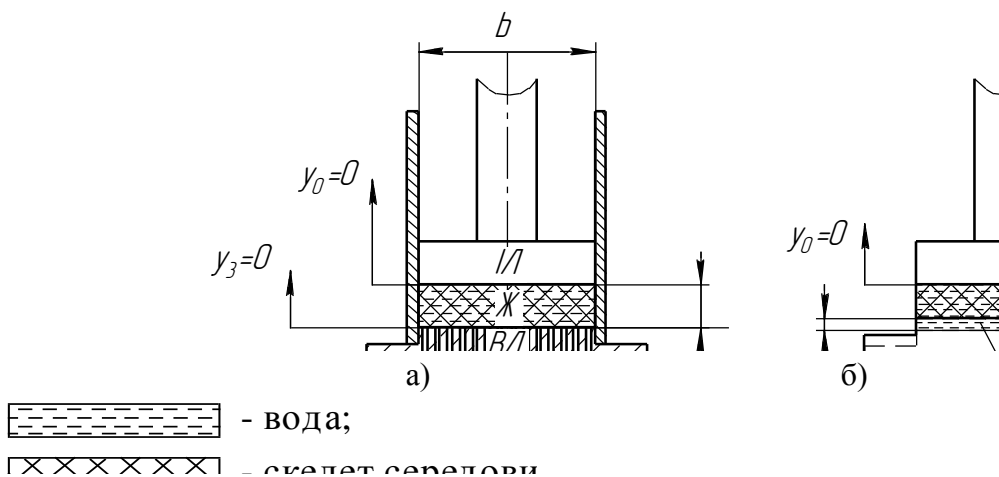
Оскільки частина води в жомі зв'язана хімічно та практично не видаляється механічними способами переробки, можна припустити, що ця вода є частиною скелета пористого середовища жому. Тоді з врахуванням густини сушеного жому вологістю  $\approx 5\%$ , що складає  $600 \text{ кг/м}^3$  [11], і з допустимим припущенням можна записати

$$f = 1 - \frac{(1,67 \cdot m_{cp} + 0,2 \cdot m_B)}{0,8 \cdot m_B + (1,67 \cdot m_{cp} + 0,2 \cdot m_B)}. \quad (5)$$

Незначні втрати сухих речовин під час процесів механічного зневоднення та мінімальний вміст повітря в жомі дозволяють прийняти  $m_{cp}=\text{const}$  і припустити, що зміна пористості жому відбуватиметься за рахунок зменшення маси води  $m_B$ .

Скелетом пористого середовища, як правило, розглядається його тверда фаза [10,12]. В нашому випадку це суха речовина жому. Порівнюючи модулі пружності скелета і рідини середовища, а точніше – сухої речовини і води, можна з упевненістю сказати, що модуль пружності останньої є значно більшим. Таким чином, якщо розглянути фази середовища окремо, то можна припустити, що під час циклу навантаження лінійна деформація твердої фази відповідатиме руху ланки статичного навантаження в разі зневоднення накладанням статичних зусиль (рис. 2) або амплітуді руху вібраційної ланки установки в разі вібраційного зневоднення (рис. 3), а деформація рідкої фази дорівнюватиме нулю.

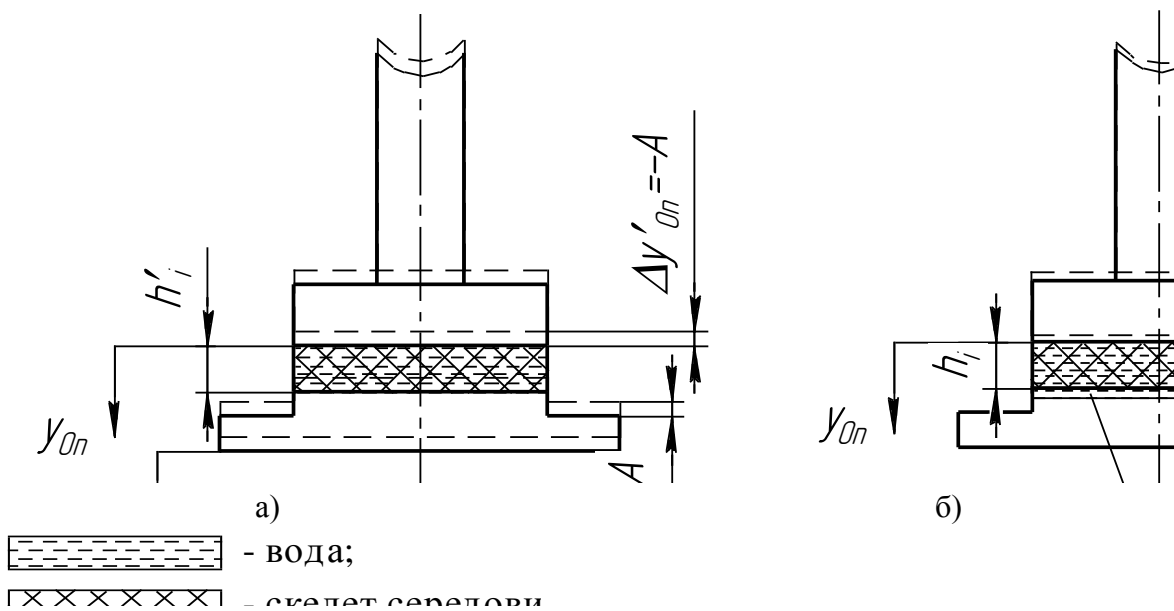




**Рис. 3. Деформація скелета та рідкої фази перехідно-пористого середовища жому цукрового буряка:**

*а) початковий стан системи вібраційна ланка(ВЛ)-жом(Ж)-інерційна ланка(ІЛ); б) стан системи ВЛ-Ж-ІЛ в кінці прямого ходу вібраційної ланки*

Останнє припущення буде справедливим, якщо деформація твердої фази в поперечному перерізі буде мінімальною та, відповідно, не спостерігатиметься перерозподіл рідкої фази в поперечному перерізі середовища. Ця умова виконуватиметься, якщо товщина шару матеріалу, який зневоднюється, буде незначною в порівнянні з шириною його поперечного перерізу.



**Рис. 4. Деформація скелета та рідкої фази перехідно-пористого середовища жому цукрового буряка під час зворотного руху:**

*а) проміжний етап зворотного руху системи ВЛ-Ж-ІЛ; б) стан системи ВЛ-Ж-ІЛ в кінці зворотного ходу вібраційної ланки*

Тоді відповідна масова частка води  $\Delta m'_{vi}$ , що буде видалена, становитиме

$$\Delta m'_{ei} = \rho_B \cdot A \cdot S \cdot f_{i-1} \cdot K, \quad (8)$$

а пористість середовища

$$f'_i = 1 - \frac{(1.67 \cdot m_{cp} + 0.2 \cdot m_g)}{m_{gi-1} - \Delta m'_{gi} + (1.67 \cdot m_{cp} + 0.2 \cdot m_B)} \quad (9)$$

Перерозподіл води між елементарними об'ємами середовища після зняття навантаження відбуватиметься, по-перше, за рахунок градієнта тиску між цими об'ємами і, по-друге, за рахунок тискотропних властивостей середовища. Цей процес матиме місце протягом другого етапу під час зворотного руху системи «Вібраційна ланка-жом-інерційна ланка» (рис. 4). В першому випадку згідно закону Дарсі інтенсивність і тривалість процесу визначатиметься швидкістю падіння тиску в середовищі, а отже, сам процес перерозподілу буде нетривалим. В другому ж випадку процес відбуватиметься після падіння тиску в середовищі та залежатиме від в'язкості води, а отже, буде більш тривалим.

Процесу перерозподілу води в матеріалі, що зневоднюється, після зняття навантаження сприятиме не тільки падіння тиску в ньому, а й рух вібраційної ланки обладнання (рис. 4, а). Оскільки повернення вібраційної ланки у вихідне положення відбувається досить швидко, а на матеріал накладається додаткове статичне навантаження, то рух матеріалу, що зневоднюється, за малих амплітуд коливання вібраційної ланки відбувається разом із рухом вібраційної ланки. Елементарні об'єми води мають масу більшу за масу елементарних об'ємів рослинної структури, і тому їм властива більша інерційність руху. Цей факт сприяє продовженню руху та, відповідно, перерозподілу води в середовищі жому і після зупинки вібраційної ланки, що одночасно супроводжуватиметься інерційним рухом інерційної ланки на відстань  $l_{ин}$ . Таким чином виділення води продовжуватиметься і після зупинки вібраційної ланки (рис. 4, б), а об'єм видаленої води складе

$$\Delta V'_i = l_{ин} \cdot S \cdot f_{i-1} \cdot K, \quad (10)$$

а загальна маса видаленої води

$$\Delta m_{gi} = \rho_B \cdot S \cdot f_{i-1} \cdot K(A + l_{ин}). \quad (11)$$

Відповідно остаточно пористість жому становитиме

$$f_i = 1 - \frac{(1.67 \cdot m_{cp} + 0.2 \cdot m_g)}{m_{gi-1} - \Delta m_{gi} + (1.67 \cdot m_{cp} + 0.2 \cdot m_B)}. \quad (12)$$

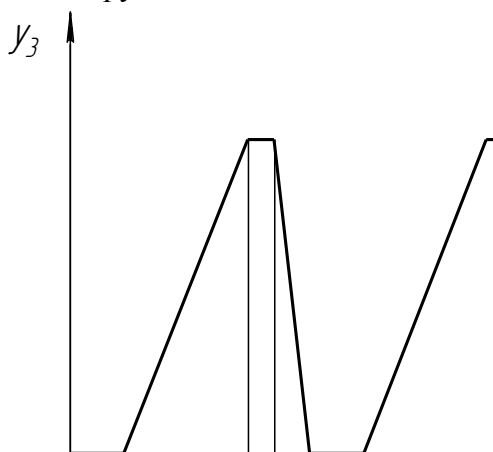
Отримана залежність є ідеалізованою моделлю вібраційного зневоднення жому цукрового буряка.

### Висновок

Грунтуючись на попередніх міркуваннях, можна зробити висновки, що для максимального видалення води з пористого матеріалу необхідно забезпечити достатні перепади тиску на зовнішніх межах елементарних об'ємів перехідно-пористого середовища жому цукрового буряка, а також достатню його прохідність. Прокідність матеріалу залежить від рівномірності деформації середовища, що створюється робочою ланкою у випадку статичного пресування або додатковим статичним навантаженням під час вібраційного зневоднення, тому значення цього тиску має бути мінімальним, що в першому випадку негативно вплине на ефективність процесу. Значні перепади тиску в середовищі можна забезпечити під час накладання вібраційних навантажень на матеріал. Для збереження прохідності середовища необхідно, щоб його сумарна деформація під час накладання

значних імпульсних навантажень була мінімальною і рівномірною, що можна забезпечити завдяки малій амплітуді коливань вібраційної ланки обладнання і відносно повільного зростання тиску. Оскільки значна частина енергії силового імпульсу витрачається на рух води в пористому середовищі, для зневоднення слід використовувати тонкий шар жому, що забезпечить максимально рівномірний розподіл енергії імпульсу та ефективне зневоднення матеріалу.

Проведений аналіз вказує на те, що в циклограмі руху вібраційної ланки системи «Вібраційна ланка-жом-інерційна ланка» повинні мати місце етапи прямого руху, зворотного руху та вистою вібраційної ланки в крайніх положеннях, а отже, мати вигляд, наведений на рис. 5. Таким чином за рахунок різниці в швидкостях руху вібраційної ланки буде забезпечено: більш рівномірне зростання тиску в середовищі жому та його рівномірну деформацію під час прямого ходу тривалістю  $t_n$ , а під час зворотного ходу тривалістю  $t_z$  – розгін маси жому, що забезпечить інерційний рух води в ньому після зупинки вібраційної ланки. Наявність етапів вистою у верхньому і нижньому положеннях тривалістю  $t_{в.вп}$  і  $t_{в.нп}$ , відповідно, дозволить: у першому випадку частково зрівноважити тиск в середовищі жому, а в другому створити – умови для виходу води, яка буде видалена під дією навантаження інерційної ланки, що продовжуватиме рух.



**Рис. 5. Циклограма руху вібраційної ланки системи «Вібраційна ланка-жом-інерційна ланка» під час механічного зневоднення жому**

Інтенсивне видалення води з жому під час його зневоднення як накладанням вібраційних, так і статичних навантажень є нетривалим. Це можна пояснити зростанням нерівномірності розподілу води в жомі і утворенням своєрідних її краплень, що мають різні розміри. Перешкодою руху цієї води в жомі, що зневоднюється, є не тільки закупорювання проходів в пористому середовищі, а і адгезія води до скелету середовища на межах їх границь [10,12]. За рахунок адгезії та значних сил поверхневого натягу, значення яких є значно вищими, ніж у більшості рідин, крапленьня води утворюють зв'язки з скелетом середовища, які зберігаються в стані спокою чи швидко відновлюються в разі незначного порушення. Цей факт дозволяє провести аналогію між крапленьнями води в середовищі та коливальною системою, яка є тілом підвішеним на пружині, що під дією зовнішніх факторів може здійснювати зміну свого положення, відновлюючи його після припинення впливу останніх.



Процес вібраційного зневоднення можна розглядати як послідовний вплив моногармонійних імпульсів зовнішніх сил, що тривають нескінченно у вигляді косинусоїдальних чи синусоїдальних хвиль з кутовими частотами  $\omega_i$ , результатом якого є суперпозиція гармонійних коливань, що відповідає складному імпульсу зовнішніх сил кінцевої тривалості.

В результаті впливу складного імпульсу зусилля в жомі відбуватиметься поширення гармонійних коливань, частота і амплітуда яких залежатиме від розподілу енергії між ними без врахування енергії, що витрачається на подолання внутрішніх сил опору середовища. Результатом поширення таких хвиль можуть стати резонансні явища, що викликать різкі порушення стану спокою коливальних систем вкрапель води в разі співпадання зовнішніх і власних частот коливань, і, відповідно, сприятимуть перерозподілу та руху води в середовищі.

Вплив резонансних явищ на процеси ущільнення структури та її деформації взяті за основу відомої [13] резонансно-структурної теорії ущільнення порошкових матеріалів. Однозначно визначити характер протікання цих процесів в порошкових матеріалах, як і в рослинній сировині, досить складно, оскільки вони мають хаотичний характер. Тому існує і складність з визначенням найбільш ефективних режимів обробки, що найбільш точно можна зробити на основі результатів експериментальних досліджень.

### Література

1. *Переработка продукции растительного и животного происхождения* : [Под ред. Богомолова А.В.] — СПб. : ГИОРД, 2001. — 336 с.
2. *Бартенев В.Д. Разработка машины для съема плодов со срезанных ветвей облепихи* / Бартенев В.Д. // *Ползуновский альманах*. — 2005. — №1. — С.16—17.
3. *Опирский Б. Я. Новые вибрационные станки: Конструирование и расчет* / Опирский Б. Я., Денисов П. Д. — Львов : Світ, 1991. — 160 с.
4. *R. Iskovich-Lototkiy, R. Obertuh, Y. Bulyha, M. Arkhipchuck/ Structure and organization of the automated systems of designing works “ hydraulic impulse drive”* // *Buletinul Institutului Politehnic din Iasi. Tomul XLVIII (LII) Fasc. 3-4*. 2002. *Stiinta si Ingineria MAterialelor/* - P. 187-191.
5. *Stenberg M. P. Leung H. Some application of water in foods*. – London, New-York, San-Francisco. : Acad. Press, 1985.
6. *Харин В.М. Тепло- и влагообменные процессы и аппараты пищевых производств (теория и расчет)* / В.М. Харин, Г.В. Агафонов. — М. : Пищевая промышленность, 2002. — 472 с.
7. *Казаков К.В. Разработка энергосберегающей технологии сушки свекловичного жома с исследованием параметров шнекового пресса: дис. канд. техн. наук : 05.20.01/Казаков Константин Владимирович – К., 2002. – 156 с.*
8. *Упругопластическое деформирование и разрушение материалов при нестационарных силовых и тепловых воздействиях*. — К. : Вища школа, 1985. — 139 с.
9. *Хайлис Г.А. Механика растительных материалов* / Хайлис Г.А. — Киев : УААН, 1994. — 332 с.
10. *Фролов Ю.Г. Поверхностные явления и дисперсные системы. Учебник для вузов. 2-е изд.* / Фролов Ю.Г. — М. : Химия, 1988. 464 с.
11. *Орлов В.Д. Производство сушеного свекловичного жома* / В.Д. Орлов, А.С. Заборсин, Л. Яровой. — М. : Легкая и пищевая промышленность, 1983. — 112 с.
12. *Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде* / М. Маскет ; Перев. с англ. М.А. Геймана — Москва-Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотичная динамика», 2004. — 628 с.
13. *Искович-Лотоцкий Р. Д. Машины вибрационного и виброударного действия* / Р. Д. Искович-Лотоцкий, И. Б. Матвеев, В. А. Крат. — К. : Техніка, 1982. — 208 с.