

Севостьянов І.В.

Іскович-Лотоцький Р.Д.

Вінницький національний  
технічний університет

УДК 621.979:621.768.4.06

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВІБРОУДАРНОГО СЕПАРУВАННЯ ВОЛОГИХ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ

*В статье обосновываются допущения, принятые при моделировании процессов сепарирования влажных дисперсных материалов методом их виброударного инерционного нагружения. Приведены упрощенные динамические и математические модели указанных процессов, которые представляют собой уравнения движения частиц твердой и жидкостной фракций порции обрабатываемого материала, а также уравнения движения исполнительных элементов вибропрессовой установки*

*It is substantiating of admittances, that taking on under modelling of the processes of separating of damp dispersible materials with use of method their vibro-blowing inertia loading in this article. It is bringing simplified dynamical and mathematical models of this processes, that to be equations of the motion of particles of solid and liquid faction of portion of processing material, and also equations of motion of executive elements of vibro-pressing plant.*

Технологічні процеси віброударного інерційного навантаження вже порівняно давно і успішно застосовуються в різних галузях промисловості, будівництва, сільського господарства та на транспорті [1]. Останнім часом розглядається можливість та доцільність їх використання при сепаруванні вологих дисперсних матеріалів, зокрема з метою видалення вологи з різних вторинних продуктів харчових та переробних виробництв (спиртової барди, пивної дробини, бурякового жому, фруктової та ягідної макухи тощо), тверда фракція яких може служити як цінна високопоживна добавка до сільськогосподарських кормів. Як показали результати проведених авторами теоретичних та експериментальних досліджень [2, 3], у випадку заміни статичного пресування вказаних вище матеріалів, віброударним інерційним, у десятки разів підвищується продуктивність процесу сепарування, більш ніж на порядок зменшується

потрібне зусилля навантаження, крім цього, у 1,5 – 2 рази знижується кінцева вологість оброблюваного продукту. Метод віброударного інерційного навантаження найбільш ефективно реалізується на вібропресових установках з гідроімпульсним приводом (ГІП) [1].

Для визначення оптимальних параметрів віброударного інерційного навантаження (енергії, що передається виконавчим елементам вібропресової установки у продовж кожного циклу спрацьовування ГІП, амплітуди і частоти їх коливань [1]), виходячи із заданих початкових та кінцевих значень фізико-механічних параметрів оброблюваного продукту (вологості, густини, пружності, пластичності, міцності зв'язків між його частинками та гранулометричного складу), потрібно провести математичний аналіз взаємодії частинок дисперсного середовища між собою та з виконавчими елементами установки. Вказаний аналіз слід здійснювати з позицій механіки,

гідравліки та реології. При цьому за допомогою методів механіки описується взаємодія виконавчих елементів з оброблюваним матеріалом, як механічним об'єктом, тоді як гідравліка і реологія дозволяють змодельовувати внутрішні процеси у середовищі.

Параметри оброблюваного матеріалу, виконавчих елементів установки, взаємодія у різних напрямках напружень та деформацій можуть бути достатньо точно відображені на відповідних динамічних моделях, що при необхідності розробляються для окремих етапів спрацьовування приводу машини (на кожному етапі змінюється величина рушійної сили та сил демпфірування, а для деяких з них й напрямки дії), для кожної фракції, яка входить до складу дисперсного середовища (твердих частинок, рідинної або газоподібної складової), а також для різних ділянок порції (ділянки, ближчі до днища та бокових стінок прес-форми мають більшу вологість, ніж ділянки, розташовані по її осі). При цьому застосовуються умовні позначення приведених мас, пружних, пластичних та в'язких елементів, а також елементів сухого тертя [1, 4]. За допомогою клинового елемента можна відтворювати ущільнення матеріалу; для відображення деформації у взаємно-перпендикулярних напрямках використовуються передавальні відношення  $i_{x,y,z}$ .

У зв'язку із складністю аналізу динамічних та математичних моделей, що враховують достатньо повний перелік факторів та параметрів розглядуваних системи та процесу при визначенні оптимальних режимів навантаження вологих дисперсних матеріалів, для спрощення досліджень та забезпечення можливості створення у подальшому інженерної практично придатної методики проектного розрахунку процесів та обладнання для віброударного інерційного сепарування, потрібно прийняти ряд припущень.

Як вказувалось у роботі [5], на частинки твердої та рідинної фракції порції матеріалу, що піддається сепаруванню діють сили міжмолекулярної взаємодії, під впливом яких дані частинки притягуються та відштовхуються одна від одної. Вказані сили взаємно компенсуються і, таким чином, частинки за відсутності зовнішнього силового навантаження, знаходячись у зваженому стані, коливаються біля положень рівноваги.

Тверді частинки практично у продовж всього процесу сепарування розділені рідинними каналами. Згідно із резонансно-структурною

теорією процесів віброударного інерційного пресування при інерційному навантаженні дисперсних мас [1], під час їх реалізації частинки оброблюваного матеріалу періодично й рівномірно перерозподіляються в об'ємі прес-форми (у випадку віброударного навантаження вологих дисперсних матеріалів даний процес буде відбуватись навіть більш ефективно, ніж під час пресування сухих порошків, оскільки в першому випадку тверді частинки занурені у рідинну фракцію й мають додаткову рухомість в напрямку прикладеного зусилля [5]). У зв'язку із цим, можна допустити, що в ході сепарування, в міру зближення та ущільнення твердих частинок, площа поперечного перерізу рідинних каналів між ними зменшується приблизно однаково у всьому об'ємі прес-форми. Таким чином, під час всього процесу віброударного пресування тверді частинки будуть відокремлені одна від одної шарами вологої фракції (відстані між їх центрами мас будуть значно більшими значень  $10^{-9}$  -  $10^{-10}$  м, на яких починається молекулярна взаємодія сусідніх частинок). Одразу після видалення з каналів скелету основи рідини, пресування потрібно припинити, оскільки в іншому випадку розпочнеться процес руйнування твердих частинок, що призведе до зниження якості готової продукції і додаткових витрат енергії та часу. Тому при проведенні динамічного аналізу сили взаємного притягнення та відштовхування частинок твердої фракції можна не враховувати.

Що стосується частинок рідини, то ті з них, які мають зі скелетом основи зв'язки фізико-механічного та структурного типу (вільна рідина), будуть в процесі віброударного навантаження і збільшення тиску в середовищі відокремлюватись, рухатись по каналах в сторону дрібних отворів у бокових стінках прес-форми і через останні витіснятись назовні. Сепарування способом віброударного пресування адсорбованої (зв'язаної) рідини є, в принципі, можливим [6], але досить енергоємним та низькопродуктивним, оскільки тверді частинки основи, на яких утримується ця рідина, являють собою колоїдні капілярно-пористі тіла. В умовах потокового виробництва, після видалення з продукту основної маси структурно зв'язаної вологи, сепарування адсорбованої рідини недоцільне. Хімічно зв'язана волога порції видаляється також при цьому не буде, отже взаємодію молекул рідинних та твердих частинок ми так само не беремо до уваги.

Для частинок рідини в середині об'єму порції, які у продовж віброударного

навантаження піддаються стисканню, ми враховуємо сили міжмолекулярного відштовхування; для рідинних частинок, що контактують із боковими стінками прес-форми і витискаються через отвори назовні – сили відштовхування (рівнодіюча даних сил для периферійних молекул вологої фракції спрямована перпендикулярно до стінок в середину об'єму порції).

З врахуванням вищевикладених припущень розроблені динамічні моделі частинок твердої та рідинної фракцій порції вологого дисперсного матеріалу в процесі її віброударного інерційного пресування, показані на рис. 1. На моделях позначені такі параметри:

$m_m$  – маса твердої частинки у повітрі;

$m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)}$  – маса тої же самої твердої частинки при її переміщенні в об'ємі порції вологого дисперсного матеріалу під час віброударного пресування (є меншою  $m_m$ , оскільки тверда частинка переміщується у рідинному середовищі й на неї діє виштовхувальна сила Архімеда);

$\rho_m(t)$ ,  $\rho_p(t)$  – поточні значення густини твердої та рідинної фракцій порції оброблюваного матеріалу;  $m_m \left(1 - \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)}\right)$  – зменшення маси твердої частинки у порівнянні з масою  $m_m$ , яке обумовлене впливом виштовхувальної сили (на рис. 1, а показано, що при зміщенні з вихідного положення маси  $m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)}$  маса  $m_m \left(1 - \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)}\right)$  залишиться на місці);

$m_p$  – маса частинки вологої фракції продукту;

$x_m, y_m, z_m, x_p, y_p, z_p$  – переміщення мас  $m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)}$  та  $m_p$  відносно осей координат  $x, y, z$ ;

$c_{mx}, c_{my}, c_{mz}, c_{px}, c_{py}, c_{pz}$  – коефіцієнти жорсткості твердої та рідинної частинок при їх переміщенні відносно осей  $x, y, z$ ;

$\alpha_{mx}, \alpha_{my}, \alpha_{mz}, \alpha_{px}, \alpha_{py}, \alpha_{pz}$  – коефіцієнти в'язкості твердої та рідинної частинок при їх переміщенні відносно осей  $x, y, z$ ;

$\mu_x, \mu_y, \mu_z$  – коефіцієнти сухого тертя твердої частинки об стінки прес-форми та інші тверді частинки відносно осей  $x, y, z$ ;

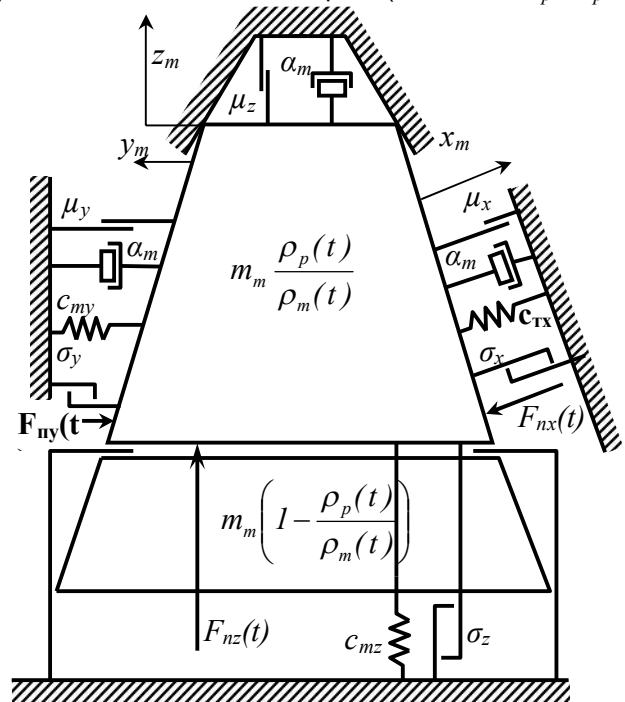
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – межі текучості твердої частинки відносно осей  $x, y, z$ ;

$a_p, b_p$  – коефіцієнти сил міжмолекулярного притягнення та відштовхування, що діють між рідинними частинками порції (величина  $a_p, b_p$

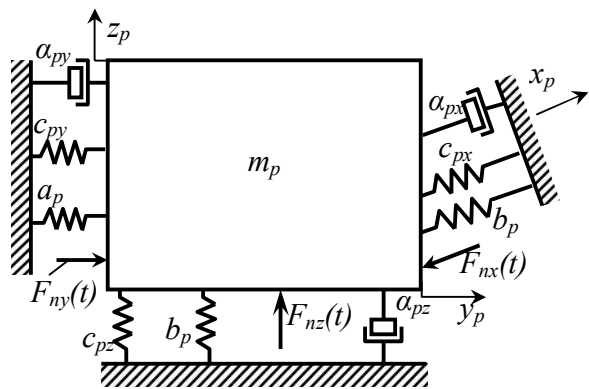
$\mu_x, \mu_y, \mu_z$  – коефіцієнти сухого тертя твердої частинки об стінки прес-форми та інші тверді частинки відносно осей  $x, y, z$ ;

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – межі текучості твердої частинки відносно осей  $x, y, z$ ;

$a_p, b_p$  – коефіцієнти сил міжмолекулярного притягнення та відштовхування, що діють між рідинними частинками порції (величина  $a_p, b_p$



а



б

Рис. 1. Динамічні моделі частинок твердої (а) та рідинної (б) фракцій порції вологого дисперсного матеріалу в процесі її віброударного інерційного пресування

залежить від структури молекул рідини [5]).

В моделі на рис. 1, б також прийнято, що розглядувана рідинна частинка контактує по осі  $y$  з боковою поверхнею прес-форми, тому відносно даної осі на неї діють сили притягнення з боку сусідніх рідинних частинок (характеризуються коефіцієнтом  $a_p$ ). Відносно осей  $x, z$  на частинку з боку сусідніх частинок вологої фракції діють сили відштовхування (характеризуються коефіцієнтом  $b_p$ ).

На динамічних моделях (див. рис. 1) позначена також вертикальна сила  $F_{nz}(t)$ , що діє на тверді та рідинні частинки порції вологого дисперсного матеріалу на початку кожного циклу спрацьовування ГП установки, з боку її нижнього виконавчого елемента. Тривалість впливу на частинки порції зусилля  $F_{nz}(t)$  відповідає часу відкриття основного запірнього елемента вібробуджувача  $t_e$  [1]. Величина  $t_e$ , розрахована для конструктивних та робочих параметрів реального зразка вібропреса з ГП моделі ІВГМ-16 [1], не перевищує 0,18 від тривалості циклу його спрацьовування  $T_u$  [7].

Значення  $F_{nz}$  у продовж  $t_e$  змінюється від 0 до  $F_{nz.max}$ , яке може бути відносно легко розраховане при відомих конструктивних параметрах вібропресової установки [2].

Силовий імпульсний вплив на частинки порції вологого дисперсного матеріалу з боку виконавчих елементів ГП відносно осей  $x, y$  можна визначити як добуток  $F_{nz}(t)$  на коефіцієнт  $k_f$  передачі зусилля

$$F_{nx}(t) = F_{nz}(t) \cdot k_f; \quad 0 < t \leq t_e; \quad (1)$$

$$F_{ny}(t) = F_{nz}(t) \cdot k_f; \quad 0 < t \leq t_e.$$

Значення  $k_f$  орієнтовно може бути прийнятим рівним 0,5.

Рівняння математичної моделі, що описують рух твердої та рідинної частинки порції вологого дисперсного матеріалу відносно осей  $x, y, z$  в процесі її віброударного інерційного пресування необхідно розробляти окремо для кожного з двох етапів робочого циклу ГП: I етап – відкриття вібробуджувача ГП, під час якого величина зусилля на нижньому виконавчому елементі привода, що починає переміщення вверх, і разом з ним значення складових рушійних сил  $F_{nx}, F_{ny}, F_{nz}$ , що діють на частинки

оброблюваного матеріалу, збільшуються від 0 до максимуму; II етап – вільний коливальний рух виконавчого елемента ГП, його переміщення у граничне верхнє та повернення у вихідне нижнє положення; при цьому величина зовнішнього зусилля на виконавчому елементі та значення сил  $F_{nx}, F_{ny}, F_{nz}$ , які діють на частинки оброблюваного матеріалу дорівнюють нулю.

Рівняння руху твердої частинки, складені на основі представленої на рис. 1, а динамічної моделі, мають вигляд

для I-го етапу спрацьовування ГП

$$\begin{aligned} m_m \left( \ddot{x}_m - g \frac{\rho_{pl}(t)}{\rho_m(t)} \right) + \alpha_{mx} \dot{x}_m + c_{mx} x_m + \\ + m_m g \frac{\rho_{pl}(t)}{\rho_m(t)} \mu_m \operatorname{sign}(\dot{x}_m) = F_{nz}(t) \cdot k_f; \\ 0 < t \leq t_e; \\ m_m \left( \ddot{y}_m - g \frac{\rho_{pl}(t)}{\rho_m(t)} \right) + \alpha_{my} \dot{y}_m + c_{my} y_m + \\ + m_m g \frac{\rho_{pl}(t)}{\rho_m(t)} \mu_m \operatorname{sign}(\dot{y}_m) = F_{nz}(t) \cdot k_f; \\ 0 < t \leq t_e; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} m_m \left( \ddot{z}_m - g \frac{\rho_{pl}(t)}{\rho_m(t)} \right) + \alpha_{mz} \dot{z}_m + c_{mz} z_m + \\ + m_m g \frac{\rho_{pl}(t)}{\rho_m(t)} \mu_m \operatorname{sign}(\dot{z}_m) = F_{nz}(t); \\ 0 < t \leq t_e; \end{aligned}$$

для II-го етапу спрацьовування ГП

$$\begin{aligned} m_m \left( \ddot{x}_m - g \frac{\rho_{pl}(t)}{\rho_m(t)} \right) + \alpha_{mx} \dot{x}_m + c_{mx} x_m + \\ + m_m g \frac{\rho_{pl}(t)}{\rho_m(t)} \mu_m \operatorname{sign}(\dot{x}_m) = 0; \\ t_e < t \leq T_u; \\ m_m \left( \ddot{y}_m - g \frac{\rho_{pl}(t)}{\rho_m(t)} \right) + \alpha_{my} \dot{y}_m + c_{my} y_m + \\ + m_m g \frac{\rho_{pl}(t)}{\rho_m(t)} \mu_m \operatorname{sign}(\dot{y}_m) = 0; \end{aligned} \quad (3)$$

$$t_e < t \leq T_u;$$

$$m_m \left( \ddot{z}_m - g \frac{\rho_{pII}(t)}{\rho_m(t)} \right) + \alpha_{mz} \dot{z}_m + c_{mz} z_m +$$

$$+ m_m g \frac{\rho_{pII}(t)}{\rho_m(t)} \mu_m \text{sign}(\dot{z}_m) = 0;$$

$$t_e < t \leq T_u.$$

Рівняння руху рідинної частинки, розташованої на початку процесу віброударного навантаження поблизу від бокової стінки прес-форми, розроблені на основі динамічної моделі, що наведена на рис. 1, б, можуть бути записані у такому вигляді

для I-го етапу спрацьовування ГП

$$m_p \ddot{x}_p + \alpha_{px} \dot{x}_p + c_{px} x_p + \frac{b_p}{r_p^m(t)} = F_{nz}(t) \cdot k_f;$$

$$9 < m < 15; 0 < t \leq t_e;$$

$$m_p \ddot{y}_p + \alpha_{py} \dot{y}_p + c_{py} y_p + \frac{a_p}{r_p^7(t)} = F_{nz}(t) \cdot k_f;$$

$$0 < t \leq t_e; \quad (4)$$

$$m_p \ddot{z}_p + \alpha_{pz} \dot{z}_p + c_{pz} z_p + \frac{b_p}{r_p^m(t)} = F_{nz}(t);$$

$$0 < t \leq t_e; 9 < m < 15;$$

для II-го етапу спрацьовування ГП

$$m_p \ddot{x}_p + \alpha_{px} \dot{x}_p + c_{px} x_p + \frac{b_p}{r_p^m(t)} = 0;$$

$$9 < m < 15; t_e < t \leq T_u;$$

$$m_p \ddot{y}_p + \alpha_{py} \dot{y}_p + c_{py} y_p + \frac{a_p}{r_p^7(t)} = 0;$$

$$t_e < t \leq T_u; \quad (5)$$

$$m_p \ddot{z}_p + \alpha_{pz} \dot{z}_p + c_{pz} z_p + \frac{b_p}{r_p^m(t)} = 0;$$

$$9 < m < 15; t_e < t \leq T_u,$$

де  $r_p(t)$  – поточне значення відстані між центрами мас молекул рідинної фракції.

Для розв'язання рівнянь (2, 3) потрібно розробити рівняння руху нижнього та верхнього виконавчого елементів установки відносно осі  $z$  у

процесі віброударного інерційного навантаження порції вологого дисперсного матеріалу. Останні мають вигляд:

для I-го етапу спрацьовування ГП

$$m_I \ddot{z}_I + (\alpha_{yz} + \alpha_{mz})(\dot{z}_I - \dot{z}_{II}) + (c_y + c_{mz}) \times$$

$$\times (z_I - z_{II}) + m_m g \cdot \mu_m \text{sign}(\dot{z}_I - \dot{z}_{II}) = F_{nz}(t);$$

$$0 < t \leq t_e; \quad (6)$$

$$m_{II} \ddot{z}_{II} + (\alpha_n + \alpha_{mz})(\dot{z}_{II} - \dot{z}_I) + c_{mz}(z_{II} - z_I) +$$

$$+ (m_m g \cdot \mu_m + R_n) \text{sign}(\dot{z}_{II} - \dot{z}_I) + P_{cm} = 0;$$

$$0 < t \leq t_e;$$

для II-го етапу спрацьовування ГП

$$m_I \ddot{z}_I + (\alpha_{yz} + \alpha_{mz})(\dot{z}_I - \dot{z}_{II}) + (c_y + c_{mz}) \times$$

$$\times (z_I - z_{II}) + m_m g \cdot \mu_m \text{sign}(\dot{z}_I - \dot{z}_{II}) = 0;$$

$$t_e < t \leq T_u; \quad (7)$$

$$m_{II} \ddot{z}_{II} + (\alpha_n + \alpha_{mz})(\dot{z}_{II} - \dot{z}_I) + c_{mz}(z_{II} - z_I) +$$

$$+ (m_m g \cdot \mu_m + R_n) \text{sign}(\dot{z}_{II} - \dot{z}_I) + P_{cm} = 0;$$

$$t_e < t \leq T_u,$$

де  $m_I$  – маса нижнього виконавчого елементу установки, що враховує масу вібростолу, плунжера гідроциліндра ГП, прес-форми, крім цього,  $m_I$  включає масу порції  $m_n$  оброблюваного продукту [1];  $m_{II}$  – маса верхнього виконавчого елементу установки (інерційна маса) сума мас пуансона, рухомої траверси, змінних інерційних вантажів, поршня та штока допоміжного гідроциліндра установки;  $\alpha_{yz}$ ,  $\alpha_n$  – коефіцієнти в'язкого демпфірування в ущільненнях плунжера гідроциліндра ГП та поршня допоміжного гідроциліндра;  $c_y$  – коефіцієнт жорсткості елементів пружного повернення столу;  $R_n$  – сила сухого тертя в напрямних рухомої траверси;  $P_{cm}$  – зусилля статичного притискання пуансона до порції (необхідне для мінімізації негативних факторів режимів віброзрідження та віброкипіння в процесі віброударного навантаження порції вологого дисперсного матеріалу [6]).

Значення  $\rho_m(t)$  в об'ємі прес-форми в процесі віброударного інерційного навантаження будуть найбільшими у перерізі порції матеріалу, що контактує з нижнім торцем пуансона, а також у точках, через які проходить вертикальна вісь прес-форми. Найменші величини  $\rho_m(t)$  матиме біля днища та бокових стінок прес-форми (у випадку використання порівняно невисокої прес-

форми зміною  $\rho_m(t)$  уздовж її вертикальної осі можна знехтувати). У продовж всього процесу пресування, в міру видалення з прес-форми вологи та ущільнення частинок твердої фракції, середнє по об'єму порції значення  $\rho_m(t)$  поступово збільшується (швидкість зміни  $\rho_m(t)$  буде залежати від інтенсивності витікання назовні рідинної фракції). Крім цього, в ході кожного циклу навантаження при зміщенні прес-форми ввєрх  $\rho_m(t)$  збільшується, тоді як при поверненні її у вихідне положення – дещо зменшується.

Величини  $\rho_m(t)$  навпаки, будуть максимальними біля днища та бокових стінок прес-форми і мінімальними уздовж її осі та в перерізі нижнього торця пуансона (зміну  $\rho_m(t)$  по вертикалі можна не брати до уваги). У зв'язку із безупинним витіканням вологи з прес-форми, середнє по об'єму порції значення  $\rho_m(t)$ , постійно зменшується, як у продовж кожного циклу навантаження, так й в цілому в ході процесу пресування.

Середнє по об'єму порції поточне значення  $\rho_m(t)$  можна визначити за формулою

$$\rho_m(t) = \frac{\Sigma m_m}{W_n(t)} = \frac{m_n \cdot \varepsilon_m}{S_n (H_n - (z_I - z_{II}))}; \quad 0 < t \leq T_u, \quad (8)$$

де  $\Sigma m_m$  – маса твердої фракції порції – добуток маси порції  $m_n$  та масового вмісту  $\varepsilon_m$  у ній твердих частинок;  $W_n$ ,  $S_n$ ,  $H_n$  – поточне значення об'єму порції, площа її поперечного перерізу ( $S_n$  дорівнює площі поперечного перерізу порожнини прес-форми) та початкова висота порції;  $z_I$ ,  $z_{II}$  – переміщення нижнього та верхнього виконавчого елементів вібропресової установки.

Значення  $\rho_p(t)$  змінюється в основному на I-му етапі спрацьовування ГП ( $0 < t \leq t_e$ ) в результаті різкого збільшення  $F_{nz}$  від 0 до  $F_{nz.max}$ . При цьому зменшується  $W_n(t)$ , вологий дисперсний матеріал порції, в тому числі його рідинна фракція стискаються і, таким чином, дещо збільшується величина  $\rho_m(t)$ .

Максимальне значення останньої у момент часу  $t = t_e$  розраховується за формулою [8]

$$\rho_{p\ max} = \frac{\rho_p}{1 - \beta_p \Delta p_{n.max}} = \frac{\rho_p}{1 - \beta_p \frac{F_{nz.max}}{S_n}}, \quad (9)$$

де  $\rho_p$  – густина рідинної фракції при атмосферному тиску і температурі 20°C;  $\beta_p$  – коефіцієнт її об'ємного стискання [8];  $\Delta p_{n.max}$  – максимальний перепад тиску рідини у прес-формі, створюваний зусиллям  $F_{nz.max}$ .

При виведенні формули (9) було прийняте припущення, що за такий короткий час, яким є тривалість відкриття основного запірного елемента віброзбуджувача  $t_e$  (за даними [9] середнє значення  $t_e$  не перевищує  $10^{-3}$  с), з прес-форми виділяється мінімальна кількість вологої фракції, якою можна знехтувати й прийняти, що у продовж  $t_e$  маса даної фракції залишається постійною.

Зміну  $\rho_p(t)$  на II-му етапі спрацьовування ГП знаходимо як

$$\rho_{pII}(t) = \frac{\rho_e}{1 - \beta_e \Delta p_n(t)} = \frac{\rho_e}{1 - \beta_e \frac{F_c(t)}{S_n}}; \quad t_e < t \leq T_u, \quad (10)$$

де  $F_c(t)$  – поточне значення вертикального зусилля стиснення порції, яке для II-го етапу робочого циклу ГП визначається за формулою (див. рівняння (7))

$$F_c(t) = m_{II} \ddot{z}_{II} + (\alpha_n + \alpha_{mz})(\dot{z}_{II} - \dot{z}_I) + c_{mz}(z_{II} - z_I) + (m_m g \cdot \mu_m + R_n) \text{sign}(\dot{z}_{II} - \dot{z}_I) + P_{cm}; \quad t_e < t \leq T_u. \quad (11)$$

Розв'язуючи рівняння (2 – 11) можна розрахувати переміщення, швидкість та прискорення частинок твердої та рідинної фракції вологого дисперсного матеріалу у будь який момент часу в процесі його віброударного пресування, а також зміну густини фракцій.

Саме за рахунок дії  $F_c(t)$  у середовищі порції створюється надлишковий тиск, під впливом якого волога витікає назовні.

## Висновки

1. Аналіз механізму протікання процесів віброударного інерційного сепарування вологих дисперсних матеріалів є достатньо складним і повинен здійснюватись з позицій механіки, гідроліки та реології, а також на підставі резонансно-структурної теорії віброударного

пресування при інерційному навантаженні сухих непластичних порошкових матеріалів.

2. Для визначення оптимальних параметрів процесів віброударного сепарування, виходячи із заданих початкових та кінцевих фізико-механічних характеристик оброблюваного матеріалу, необхідно розробити динамічні моделі руху його твердих та рідинних частинок, на яких частинки показані у вигляді зведених мас, а впливи між ними – представлені пружними, в'язкими та пластичними елементами, елементами сухого тертя; крім цього враховуються міжмолекулярні взаємодії частинок та ущільнення твердої фракції.

3. Динамічні моделі розробляються з рядом припущень окремо для кожної фракції вологого дисперсного матеріалу, різних етапів циклу спрацьовування ГП установки та різних ділянок порції.

4. На основі динамічних моделей створюються математичні моделі процесів віброударного інерційного сепарування вологих дисперсних матеріалів, що мають вигляд диференціальних рівнянь руху частинок різних фракцій оброблюваного продукту та руху виконавчих елементів вібропресової установки.

### **Література**

1. Іскович-Лотоцький Р. Д. Основи теорії розрахунку та розробка процесів і обладнання для віброударного пресування. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2006. – 338 с.

2. Іскович-Лотоцький Р. Д., Севостьянов І. В. Розрахунок параметрів вібропресового обладнання з гідроімпульсним приводом для зневоднення вторинних продуктів переробних та харчових виробництв// Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. - №3 (109), 2007. – Ч. 1. – С. 105 – 108.

3. Іскович-Лотоцький Р. Д., Севостьянов І. В., Андрощук В. Д. Вібропресова машина для обезводнювання відходів харчових виробництв// Вибрації техніки і технологія. - 2002. - №3 (24). - С. 48 - 50.

4. Гончаревич І. Ф., Урьев І. Б., Талейсник М. А. Вибрационная техника в пищевой промышленности. – М.: Пищевая промышленность, 1977. – 279 с.

5. Севостьянов І. В., Іскович-Лотоцький Р. Д., Поліщук О. В. Особливості віброударного зневоднення продуктів переробних виробництв// Наукові нотатки. – Випуск 20 (травень, 2007). – С. 443 – 446.

6. Іскович-Лотоцький Р. Д., Севостьянов І. В. Вібратійні та віброударні технології в процесах сепарування вологих дисперсних матеріалів// Вібратії в техніці та технологія. - №4 (49), 2007. - С. 18 – 21.

7. Іскович-Лотоцький Р. Д., Обертюх Р. Р., Севостьянов І. В. Процеси та машини вібраторних і віброударних технологій. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2006. – 291 с.

8. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы/ Т. М. Башта, Б. Б. Некрасов и др. – М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.

9. Іскович-Лотоцький Р. Д., Матвеев І. Б., Крат В. А. Машини вібраційного і віброударного действия. - Киев: Техніка, 1982. - 208 с.