

РЕОЛОГІЧНІ МОДЕЛІ ТА РІВНЯННЯ ВОЛОГИХ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ ПІД ЧАС ЇХ ВІБРОУДАРНОГО ІНЕРЦІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Sevost'jnov I., Ivanchuk Ja.
The Vinnica National Technical University, Vinnica, Ukraine (ivansev70@mail.ru)

THE RHEOLOGICAL MODELS AND EQUATIONS OF HUMID DISPERSIVE MATERIALS IN A PROCESS OF IT VIBRO-BLOWING INERTIA LOADING

У статті наведені схема віброударного інерційного навантаження вологого дисперсного матеріалу під час його попереднього віброударного зневоднення на гідроімпульсному вібропресі у прес-формі закритого типу, безінерційні реологічні моделі матеріалу при реалізації даного навантаження, а також складені на підставі схеми та моделей рівняння, що зв'язують робочі параметри процесу, фізико-механічні характеристики оброблюваного матеріалу та конструктивні параметри вібропреса. З використанням складених рівнянь, у середовищі Matlab Simulink розроблена програма, розраховані і побудовані графіки зміни в часі деформацій твердої і рідинної фаз матеріалу на етапі його найбільш інтенсивного віброударного навантаження. Представлені у статті рівняння можуть послужити основою для розробки методики проектного розрахунку гідроімпульсного обладнання для віброударного зневоднення.

Ключові слова: реологічні моделі, вологий дисперсний матеріал, гідроімпульсний вібропрес, віброударне навантаження.

Вступ

Відходи харчових виробництв, у тому числі, спиртова барда, пивна дробина, буряковий жом, кавовий та ячмінний шлам, що відносяться до вологих дисперсних матеріалів, після зневоднення до вологості 20 - 25% можуть використовуватись як добавки до сільськогосподарських кормів або в якості палива [1]. При цьому одним з найбільш ефективних способів їх зневоднення за продуктивністю, енергоємністю та забезпечуванню кінцевою вологістю оброблюваного матеріалу, є віброударне навантаження на гідроімпульсних вібропресах [1].

Мета

Але для досягнення вказаних показників ефективності необхідно забезпечити оптимальні параметри навантаження оброблюваного матеріалу, з врахуванням його фізико-механічних характеристик: пружності та в'язкості твердої і рідинної фаз, пластичності твердих частинок та сухого тертя між ними. Відомі реологічні моделі харчових матеріалів при реалізації різноманітних технологічних процесів їх перероблення (зокрема, моделі Шведова-Бінгама, Кельвіна, Максвела, Бінгама [2]) – є непридатними під час досліджень процесів віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів, оскільки не відображають деякі їх важливі властивості (наприклад, сухе тертя твердих частинок, наявність у матеріалі вільної рідини та її взаємодію з твердою фазою), а також умови навантаження. У зв'язку із цим, представляє інтерес розробка схеми віброударного інерційного навантаження порції вологого дисперсного матеріалу при зневодненні його на гідроімпульсному вібропресі у прес-формі закритого типу [3] та безінерційних реологічних моделей матеріалу при реалізації даного навантаження. У подальшому, на підставі розроблених схеми навантаження та реологічних моделей можуть бути складені диференціальні рівняння руху виконавчих елементів вібропреса та частинок порції оброблюваного матеріалу, а також реологічні рівняння зміни дотичних та стискаючих напружень і деформацій його твердої та рідинної фаз.

Дослідження

На рис. 1 наведена схема віброударного інерційного навантаження порції вологого дисперсного матеріалу в процесі його попереднього зневоднення у прес-формі закритого типу, на якій позначені: m_l – маса нижнього виконавчого елемента вібропреса, що включає плунжер гідроциліндра гідроімпульсного привода (ГІП) площею поперечного перетину S_2 та прес-форму з оброблюваним матеріалом масою m_m [3]; $m_{лзв}$ – зведена до перетину S_2 маса верхнього виконавчого елемента, що враховує маси пуансона та робочої рідини в підсистемі допоміжного гідропривода вібропреса (даний привід створює зусилля P_{cm} статичного притискання верхнього виконавчого елемента до порції оброблюваного матеріалу [3]); H_m , D_m – початкова висота та діаметр порції оброблюваного

матеріалу у прес-формі; z_b, z_{II} – переміщення виконавчих елементів; c_y – жорсткість пружин повернення нижнього виконавчого елемента [3]; $\alpha_z, \alpha_{0,z}$ – коефіцієнти в'язкого демпфірування при переміщенні нижнього та верхнього виконавчих елементів [3]; $R_{0,z} \cdot \text{sign } z_{II}'$ – сила сухого тертя при переміщенні верхнього виконавчого елемента [3]; $\lambda_{36,0}, \zeta_{36,0}$ – зведені коефіцієнти гідравлічного тертя та місцевих опорів підсистеми допоміжного гідропривода [3]; $F_{mzI}(t), F_{mzII}(t), F_{mx\Sigma}(t), F_{my\Sigma}(t)$ – поточні значення зусиль, створюваними виконавчими елементами на частинках порції оброблюваного матеріалу відносно осей z, x, y [4]; F_k – сила, що утримує рідинну фазу оброблюваного матеріалу у капілярах твердих частинок [5].

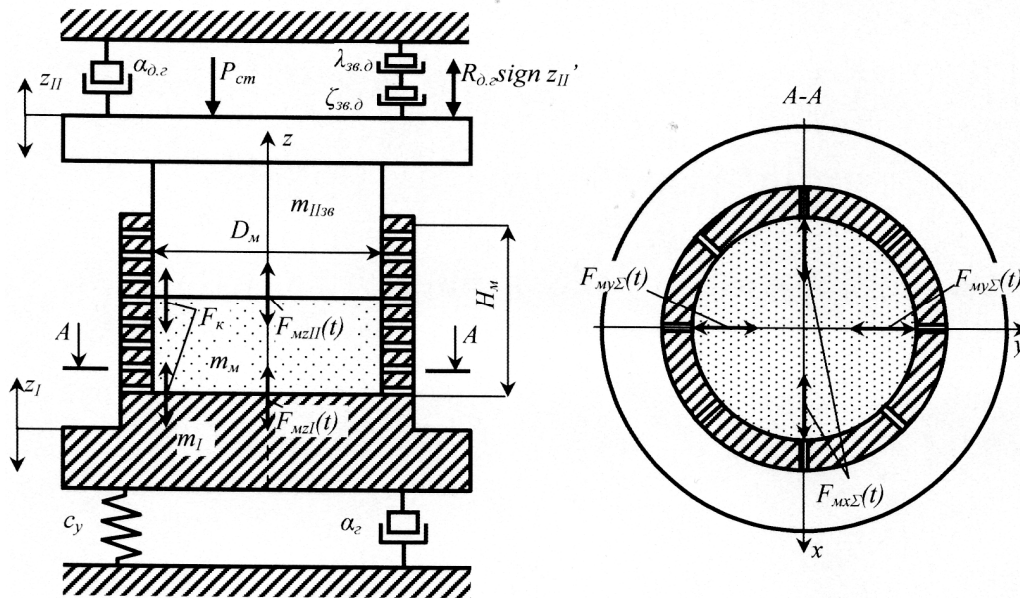


Рис. 1. Схема віброударного інерційного навантаження порції волого дисперсного матеріалу в процесі його попереднього зневоднення у прес-формі закритого типу

Під час реалізації на вібропресі процесу зневоднення його виконавчий елемент здійснює періодичні вертикальні зворотно-поступальні переміщення з частотою до 40 Гц і амплітудою до 2 мм. Таким чином, оброблюваний матеріал у прес-формі піддається віброударному інерційному навантаженню з боку пуансона, що сприяє видаленню з нього рідинної фази. Остання витікає через дрібні отвори у стінках та днищі прес-форми, закриті з середини фільтрувальною сіткою. При цьому найбільш інтенсивним навантаження оброблюваного матеріалу буде на етапі відкриття вібробудувача ГПІ вібропреса, приєднаного за схемою «на вході» [6], коли тиск у порожнині гідроциліндра ГПІ різко збільшується від p_3 , що відповідає тиску у зливному баку, на величину ударного тиску Δp_{y011} [3], в результаті чого, виконавчі елементи вібропреса з прискоренням $(8 \div 10) \cdot g$ [6] здійснюють робочий хід вгору [4]. Тривалість даного I-го етапу циклу спрацювання ГПІ позначатиме t_o [4].

Далі на рис. 2 представлені розроблені автором безінерційні реологічні моделі волого дисперсного матеріалу під час його віброударного інерційного навантаження у прес-формі (див. також рис. 1). На моделях, окрім вищевказаних позначені такі параметри: $c_{mx}, c_{my}, c_{mz}, c_{px}, c_{py}, c_{pz}$ – коефіцієнти жорсткості твердої та рідинної частинок оброблюваного матеріалу відносно осей x, y, z (рідинною частинкою ми будемо називати рідину, що знаходиться у каналі між двома найближчими твердими частинками порції); $\alpha_{mx}, \alpha_{my}, \alpha_{mz}, \alpha_{px}, \alpha_{py}, \alpha_{pz}$ – коефіцієнти в'язкості твердої та рідинної частинок при їх переміщенні відносно осей x, y, z ; μ_x, μ_y, μ_z – коефіцієнти сухого тертя твердої частинки об стінки прес-форми та інші частинки твердої фази відносно осей x, y, z ; $\tau_{0x}, \tau_{0y}, \sigma_{0z}$ – межі текучості твердої частинки відносно осей x, y, z .

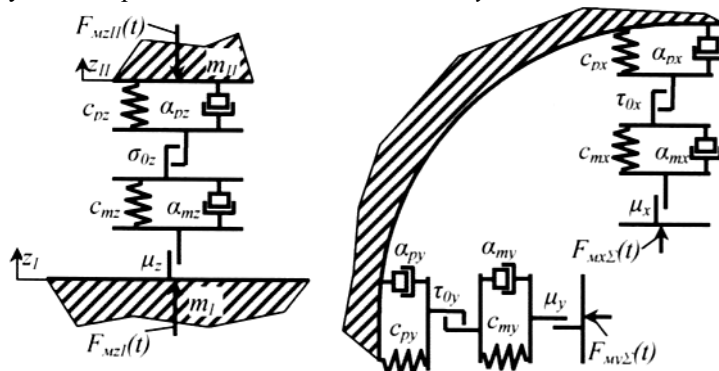


Рис. 2. Безінерційні реологічні моделі волого дисперсного матеріалу під час його віброударного інерційного навантаження у прес-формі

На початку i -го циклу віброударного інерційного навантаження порції матеріалу у прес-формі, при зближенні твердих частинок відбувається їх сухе тертя та взаємодія зі стінками прес-форми, що характеризуються коефіцієнтом μ . Практично одночасно починається також стискання твердої фази з її переміщенням з в'язким тертям у рідинній фазі (коефіцієнти c_m, α_m), а при подальшому збільшенні навантаження і перевищення межі $\tau_0 (\sigma_0)$ – пластична деформація твердих частинок. Оскільки пружні і пластичні деформації твердої фази будуть відрізнятися за величиною, в даному випадку має бути використане послідовне сполучення відповідних елементів [7]. Нарешті, на завершальній стадії збільшення навантажень, після завершення деформації твердих частинок матеріалу, відбувається стискання рідинної фази (коефіцієнти c_p, α_p).

Міжмолекулярні сили відштовхування рідинних частинок [8] у моделях на рис. 2 не враховані через значну величину цих сил у порівнянні із зусиллями $F_{mzI}(t), F_{mzII}(t)$. У роботі [9] наведений розрахунок результуючого максимального зусилля $F_{mz\Sigma max} = F_{mzI max} + F_{mzII max}$, що діє на частинки порції вологого дисперсного матеріалу у прес-формі при зневодненні його на експериментальному гідроімпульсному стенді, створеному на базі вібропреса ІВІМ-16 [6]. Значення цього зусилля є на декілька порядків меншим сил міжмолекулярного відштовхування [8]. До цього ж при стисканні матеріалу частина рідинної фази виливається через фільтрувальні отвори прес-форми назовні, таким чином, тиск $\Delta p_m(t)$ у середовищі матеріалу [4] не може бути занадто великим. Отже, нехтування міжмолекулярними взаємодіями під час складання представлених на рис. 2 реологічних моделей є цілком виправданим.

На підставі даних моделей складаємо систему реологічних рівнянь зміни дотичних і стискаючих напружень, а також деформацій порції оброблюваного матеріалу у продовж i -го циклу його віброударного інерційного навантаження, у прес-формі, на I-му етапі циклу спрацювання ГПІ відносно осей x, y, z

$$\begin{cases} \tau_{m.c.m} = \tau_{m.np} + \tau_{m.v.m} = \tau_{m.tek} = \tau_{p.np} + \tau_{p.v.m}; & \begin{cases} \tau_{m.c.m} = \tau_{m.np} + \tau_{m.v.m} = \tau_{m.tek} = \tau_{p.np} + \tau_{p.v.m}; \\ y_{\Sigma} = y_p + y_m; \end{cases} \\ x_{\Sigma} = x_p + x_m; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma_{m.c.m} = \sigma_{m.np} + \sigma_{m.v.m} = \sigma_{m.tek} = \sigma_{p.np} + \sigma_{p.v.m}; \\ z_{\Sigma} = z_p + z_m; \end{cases} \quad 0 \leq t \leq t_0, \quad (1)$$

де $\tau_{m.c.m}, \tau_{m.np}, \tau_{m.v.m}, \tau_{m.tek}, \tau_{p.np}, \tau_{p.v.m}, \sigma_{m.c.m}, \sigma_{m.np}, \sigma_{m.v.m}, \sigma_{m.tek}, \sigma_{p.np}, \sigma_{p.v.m}$ – дотичні та стискаючі напруження, створювані силами сухого тертя, силами пружності та силами в'язкого тертя твердих частинок, дотичні і стискаючі напруження їх текучості, а також дотичні і стискаючі напруження, створювані силами пружності та силами в'язкого тертя рідинних частинок матеріалу; $x_{\Sigma}, y_{\Sigma}, z_{\Sigma}, x_p, y_p, z_p, x_m, y_m, z_m$ – сумарні деформації порції оброблюваного матеріалу у продовж i -го циклу віброударного навантаження відносно осей x, y, z ; деформації за цей же час рідинної та твердої фаз порції відносно осей x, y, z .

У верхніх рівняннях кожної з систем (1) прирівнюються напруження послідовно з'єднаних груп елементів опору, при цьому в другій і четвертій за порядком групах напруження паралельно сполучених елементів додаються [7]. У нижніх рівняннях кожної з систем (1) сумарні деформації порції оброблюваного матеріалу визначаються як суми деформацій послідовно з'єднаних груп елементів опору [7].

Системи (1) перетворюються далі до вигляду

$$\begin{cases} \frac{\mu_x F_{mx\Sigma}(t)}{S_m} = \frac{c_{mx} x_{m.np} + \alpha_{mx} \dot{x}_m}{S_m} = \frac{\sigma_{0x}}{S_m} = \frac{c_{px} x_p + \alpha_{px} \dot{x}_p}{S_m}; & \begin{cases} \frac{\mu_y F_{my\Sigma}(t)}{S_m} = \frac{c_{my} y_{m.np} + \alpha_{my} \dot{y}_m}{S_m} = \frac{\sigma_{0y}}{S_m} = \frac{c_{py} y_p + \alpha_{py} \dot{y}_p}{S_m}; \\ y_I - y_{II} = 0 = y_p + y_{m.nl} + y_{m.np}; \end{cases} \\ x_I - x_{II} = 0 = x_p + x_{m.nl} + x_{m.np}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{\mu_z F_{mz\Sigma}(t)}{S_m} = \frac{c_{mz} z_{m.np} + \alpha_{mz} \dot{z}_m}{S_m} = \frac{\sigma_{0z}}{S_m} = \frac{c_{pz} z_p + \alpha_{pz} \dot{z}_p}{S_m}; \\ z_I - z_{II} = z_p + z_{m.nl} + z_{m.np}; \end{cases} \quad 0 \leq t \leq t_0, \quad (2)$$

де $x_{m.nl}, x_{m.np}, y_{m.nl}, y_{m.np}, z_{m.nl}, z_{m.np}$ – пластичні та пружні деформації твердої фази порції відносно осей x, y, z ; S_m – площа поперечного перетину порції.

Помножуючи всі частини верхніх рівнянь кожної з систем (2) на S_m і здійснюючи певні перетворення, остаточно отримуємо

$$\begin{cases} \frac{c_{px} x_p + \alpha_{px} \dot{x}_p - c_{mx} x_{m.np} - \alpha_{mx} \dot{x}_m - \tau_{0x}}{\mu_x} = F_{mx\Sigma}(t); & \begin{cases} \frac{c_{py} y_p + \alpha_{py} \dot{y}_p - c_{my} y_{m.np} - \alpha_{my} \dot{y}_m - \tau_{0y}}{\mu_y} = F_{my\Sigma}(t); \\ y_p + y_{m.nl} + y_{m.np} = 0; \end{cases} \\ x_p + x_{m.nl} + x_{m.np} = 0; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{c_{pz}z_p + \alpha_{pz}\dot{z}_p - c_{mz}z_{m.np} - \alpha_{mz}\dot{z}_m - \sigma_0z}{\mu_z} = F_{Mz\Sigma}(t); & 0 \leq t \leq t_0. \\ z_I - z_{II} = z_p + z_{m.nl} + z_{m.np}; \end{cases} \quad (3)$$

На рис. 3 наведена аналітична залежність напружень від деформацій у середовищі вологого дисперсного матеріалу під час його віброударного інерційного навантаження на I-му етапі циклу спрацьовування ГП. На графіку можна виділити: ділянку I, що дозволяє визначити напруження під час пружної деформації, сухого і в'язкого тертя твердих частинок; ділянку II, яка характеризує напруження, що є результатом пластичної деформації частинок твердої фази; ділянку III, що характеризує зміну дотичних та стискаючих напружень у рідинній фазі порції оброблюваного матеріалу, обумовлених її пружною деформацією та в'язким тертям.

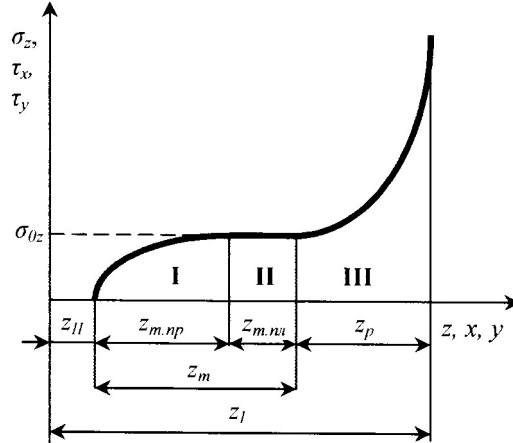


Рис. 3. Аналітична залежність напружень від деформацій у середовищі вологого дисперсного матеріалу під час його віброударного інерційного навантаження на I-му етапі циклу спрацьовування ГП

Для розв'язання рівнянь (3), з використанням схеми та моделей на рис. 1, 2 складаємо диференціальні рівняння для визначення зусиль $F_{MzI}(t)$, $F_{MzII}(t)$, $F_{Mz\Sigma}(t)$, рівняння збереження імпульсу і балансів енергії виконавчих елементів вібропреса, а також рівняння руху твердої і рідинної частинок оброблюваного матеріалу на I-му етапі циклу спрацьовування ГП, відносно осі z [3, 4].

$$F_{MzI}(t) = \frac{\left((\Delta p_{y\partial 11} + p_3) \cdot S_c - m_I(\ddot{z}_I + g) - (\alpha_z + \alpha_{mz} + \alpha_{pz}) \times \right.}{1 + k_f \mu_z \text{sign}(\dot{z}_I - \dot{z}_{II})}; \quad (4)$$

$$F_{MzII}(t) = \frac{m_{II3\partial}(g + \ddot{z}_{II}) + (\alpha_{\partial,z} + \alpha_{mz} + \alpha_{pz})(\dot{z}_{II} - \dot{z}_I) + c_{mz}(z_{II} - z_I) + R_{\partial,z} \text{sign}(\dot{z}_{II} - \dot{z}_I) + \sigma_0z + P_{cm} + F_K}{1 - k_f \mu_z (\dot{z}_{II} - \dot{z}_I)};$$

$$F_{Mz\Sigma}(t) = F_{MzI}(t) + F_{MzII}(t); \quad t(S_c \cdot \Delta p_{y\partial 11} - c_y \cdot (z_{0y} + z_I)) = m_I \cdot \dot{z}_I + m_{II3\partial} \dot{z}_{II} (1 + \lambda_{3\partial,\partial} + \zeta_{3\partial,\partial});$$

$$m_{1p} \left(v_{1p}^2 - \dot{z}_I^2 \frac{S_c^2}{f_1^2} \right) + \frac{l_1 \cdot f_1 (\Delta p_{y\partial 1}^2 - \Delta p_{y\partial 11}^2) (K_{p,y1} + K_1)}{2 \cdot K_{p,y1} \cdot K_1} = \frac{m_I \cdot \dot{z}_I^2}{2} + \frac{m_{II3\partial} \cdot \dot{z}_{II}^2}{2} (1 + \lambda_{3\partial,\partial} + \zeta_{3\partial,\partial}) + \frac{c_y \cdot (z_{0y} + z_I)^2}{2};$$

$$m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)} (\ddot{z}_m + g) + \alpha_{mz} \dot{z}_m + c_{mz} z_m + \sigma_0z = F_{Mz\Sigma}(t) (1 - k_f \mu_z \text{sign}(\dot{z}_m));$$

$$m_p (\ddot{z}_p + g) + \alpha_{pz} \dot{z}_p + c_{pz} z_p + F_K = F_{Mz\Sigma}(t); \quad 0 \leq t \leq t_0,$$

де m_{1p} – зведена до перетину S_c маса робочої рідини у гідролінії довжиною l_1 та площею прохідного перетину f_1 , по якій вона надходить до порожнини гідроциліндра ГП; $\Delta p_{y\partial 1}$ – ударне підвищення тиску робочої рідини у гідролінії довжиною l_1 [3, 10]; $K_{p,y1}$ – модуль об'ємної пружності робочої рідини у гідролінії довжиною l_1 при тиску $\Delta p_{y\partial 1} + p_3$ [3, 10]; K_1 – модуль об'ємної пружності стінок гідролінії довжиною l_1 ; k_f – коефіцієнт передачі зусилля від виконавчих елементів вібропреса частинкам порції оброблюваного матеріалу по осях x і y [4]; z_{0y} – величина попереднього стискання пружин повернення нижнього виконавчого елемента [3]; $\rho_p(t)$, $\rho_m(t)$ – поточні значення густини рідинної та твердої фаз оброблюваного матеріалу [4].

У зв'язку із тим, що під час зневоднення на вібропресі вміст твердої фази у оброблюваному матеріалі складає 20 – 25%, можна вважати, що за своїми властивостями він наближається до ньютонівських рідин [7].

Тому тиск, створений у матеріалі відносно осі z , практично без змін передається по осях x і y . Отже значення k_f орієнтовно може бути прийнятим рівним 0,9 [4].

Значення $\rho_p(t)$, $\rho_m(t)$ розраховуються за формулами [4]

$$\rho_m(t) = \frac{m_m \cdot \varepsilon_m}{S_m(H_m - (z_I - z_{II}))}; \quad \rho_p(t) = \frac{\rho_p}{1 - \beta_p \frac{F_{Mz\Sigma}(t)}{S_m}}; \quad 0 \leq t \leq t_o, \quad (5)$$

де ε_m - масовий вміст у порції оброблюваного матеріалу твердих частинок [4, 7]; ρ_p - густина рідинної фази при атмосферному тиску і температурі 20°C; β_p - коефіцієнт її об'ємного стискування [10].

За результатами розрахунків автора, виконаних за наведеними вище формулами, для фізико-механічних характеристик концентрату кавового шламу як оброблюваного матеріалу, а також для конструктивних і робочих параметрів вібропреса ІВПМ-16, на I-му етапі циклу спрацьовування його ГПІ, значення z_I та z_{II} практично не відрізняються одне від одного, а максимальна величина перепаду тиску Δp_m у середовищі оброблюваного матеріалу не перевищує 1 – 2 МПа. За таких умов можна знехтувати зміною ρ_p , ρ_m та вважати їх значення на I-му етапі постійними, що істотно спрощує моделювання досліджуваних процесів. У подальшому дані результати та припущення підтвердились експериментально, за допомогою гідроімпульсного стенду-прототипу, створеного на базі ІВПМ-16 [11].

Підставляючи у рівняння (3 - 5) значення фізико-механічних характеристик кавового шламу та конструктивні параметри ІВПМ-16 [6, 9, 11], отримуємо

$$\begin{cases} \frac{163880294 \cdot z_p + 0,13 \cdot \dot{z}_p - 497494 \cdot z_{m.np} - 0,0048 \cdot \dot{z}_m - 74}{0,2} = F_{Mz\Sigma}(t); \\ z_I - z_{II} = z_p + z_{m.nl} + z_{m.np}; \end{cases}$$

$$F_{MzI}(t) = \frac{9,81 \cdot 10^4 - 125 \cdot \ddot{z}_I - 172,23 \cdot \dot{z}_I - 172,23 \cdot \dot{z}_{II} - 2,897 \cdot 10^6 \cdot z_I + 4,97 \cdot 10^5 \cdot z_{II}}{1 + 0,18 \cdot (\dot{z}_I - \dot{z}_{II})};$$

$$F_{MzII}(t) = \frac{25196,8 + 80,51 \cdot \ddot{z}_{II} + 11926,9 \cdot \dot{z}_{II} - 11926,9 \cdot \dot{z}_I + 4,97 \cdot 10^5 \cdot z_{II} - 4,97 \cdot 10^5 \cdot z_I}{1 - 0,18(\dot{z}_{II} - \dot{z}_I)}; \quad (6)$$

$$F_{Mz\Sigma}(t) = F_{MzI}(t) + F_{MzII}(t); \quad 125 \cdot \dot{z}_I + 632,65 \cdot \dot{z}_{II} + 2,4 \cdot 10^6 \cdot z_I \cdot t - 1,08 \cdot 10^5 \cdot t = 0;$$

$$65,193 \cdot \dot{z}_I^2 + 316,32 \cdot \dot{z}_{II}^2 + 1,2 \cdot 10^6 \cdot z_I^2 + 4800 \cdot z_I - 0,23 = 0;$$

$$6,3 \cdot 10^{-7} \ddot{z}_m + 5,85 \cdot 10^{-3} \dot{z}_m + 6,06 \cdot 10^5 z_m + 90,24 = F_{Mz\Sigma}(t);$$

$$10^{-6} \ddot{z}_p + 0,13 \cdot \dot{z}_p + 163880294 \cdot z_p + 8633 = F_{Mz\Sigma}(t); \quad 0 \leq t \leq 1,4 \cdot 10^{-3}.$$

З використанням рівнянь (6) у середовищі Matlab R2007a Simulink складена комп'ютерна програма (рис. 4), розраховані і побудовані графіки зміни в часі зусилля $F_{Mz\Sigma}$ двостороннього віброударного навантаження оброблюваного матеріалу під час його попереднього віброударного зневоднення у прес-формі закритого типу на гідроімпульсному вібропресі, пружної $z_{m.np}$, пластичної $z_{m.nl}$ та загальної z_m деформацій твердої фази, а також стискування z_p рідинної фази матеріалу (рис. 5, 6).

Висновки

1. Аналіз графіків розрахованих теоретичних залежностей показує, що під час попереднього віброударного зневоднення вологого дисперсного матеріалу у прес-формі закритого типу на гідроімпульсному вібропресі, деформації його твердої фази на є два порядки більшими за стискування рідинної фази, що обумовлено відповідною різницею коефіцієнтів жорсткості розглядуваних фаз. Також слід відзначити, що пружна деформація твердої фази значно перевищує її пластичну деформацію.

2. Деформації та стискування фаз оброблюваного матеріалу змінюються з періодичними високочастотними коливаннями за величиною, що обумовлено нелінійним характером зміни зусилля його навантаження та власними коливаннями частинок матеріалу в області резонансу.

3. Запропоновані у статті рівняння установлюють зв'язок між робочими параметрами процесів віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів на гідроімпульсному вібропресі у прес-формі закритого типу, фізико-механічними характеристиками оброблюваного матеріалу та конструктивними параметрами використовуваного обладнання.

4. Дані рівняння можуть бути використані для розробки методики проектного розрахунку гідроімпульсного обладнання для віброударного зневоднення, що дозволить визначати його оптимальні конструктивні параметри, виходячи із заданих фізико-механічних характеристик оброблюваного матеріалу та параметрів його навантаження, за умови забезпечення найвищої ефективності робочого процесу (максимальної продуктивності, мінімальної енергоємності та заданої кінцевої вологості концентрату матеріалу).

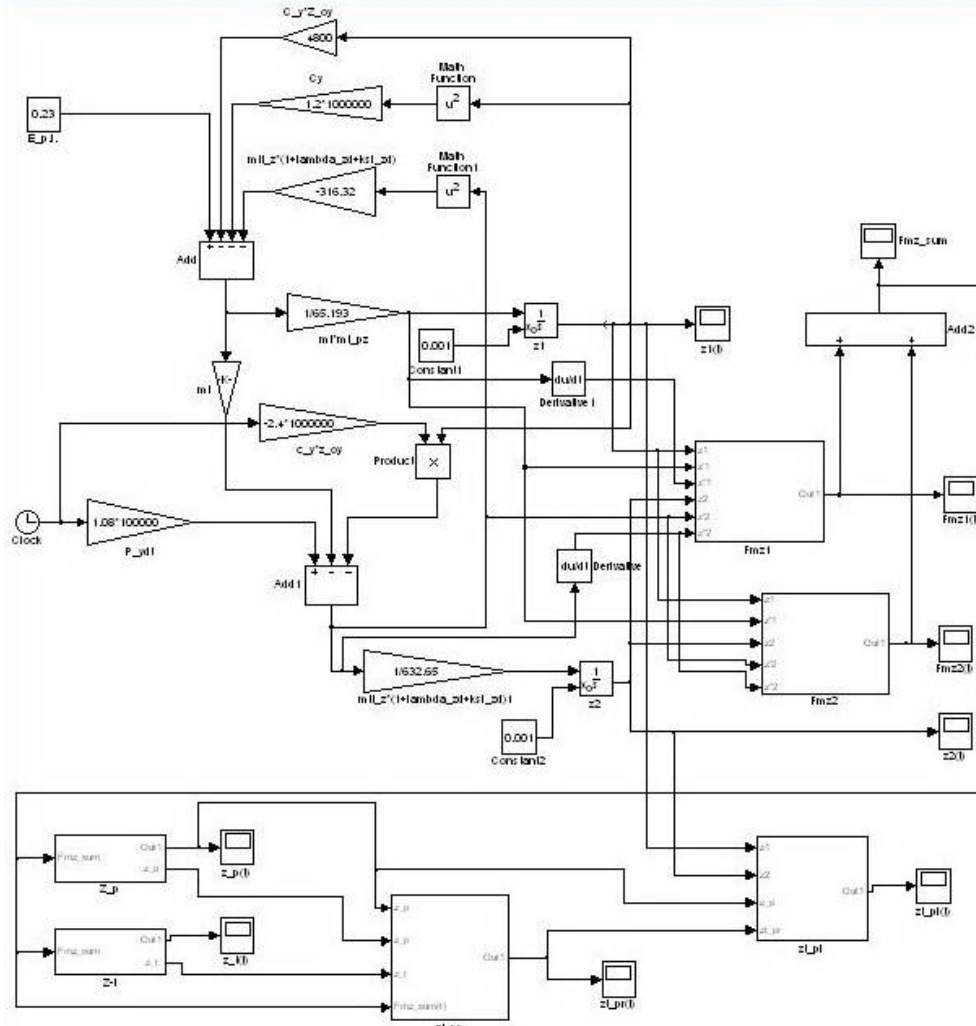


Рис. 4. Блок-схема Simulink-програми з розрахунку деформацій та стиснення твердої і рідинної фаз вологого дисперсного матеріалу під час його віброударного зневоднення у прес-формі закритого типу

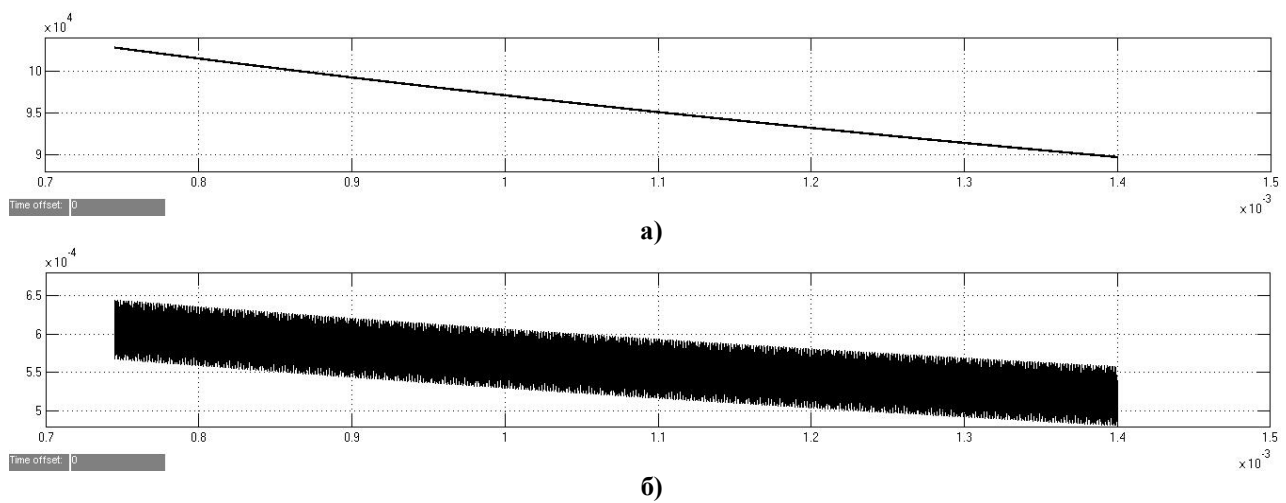


Рис. 5. Графіки зміни в часі: а) – зусилля $F_{M\Sigma\Sigma}$ двостороннього віброударного навантаження вологого дисперсного матеріалу під час його попереднього віброударного зневоднення у прес-формі закритого типу на гідроімпульсному вібропресі; б) – стиснення z_p рідинної фази матеріалу

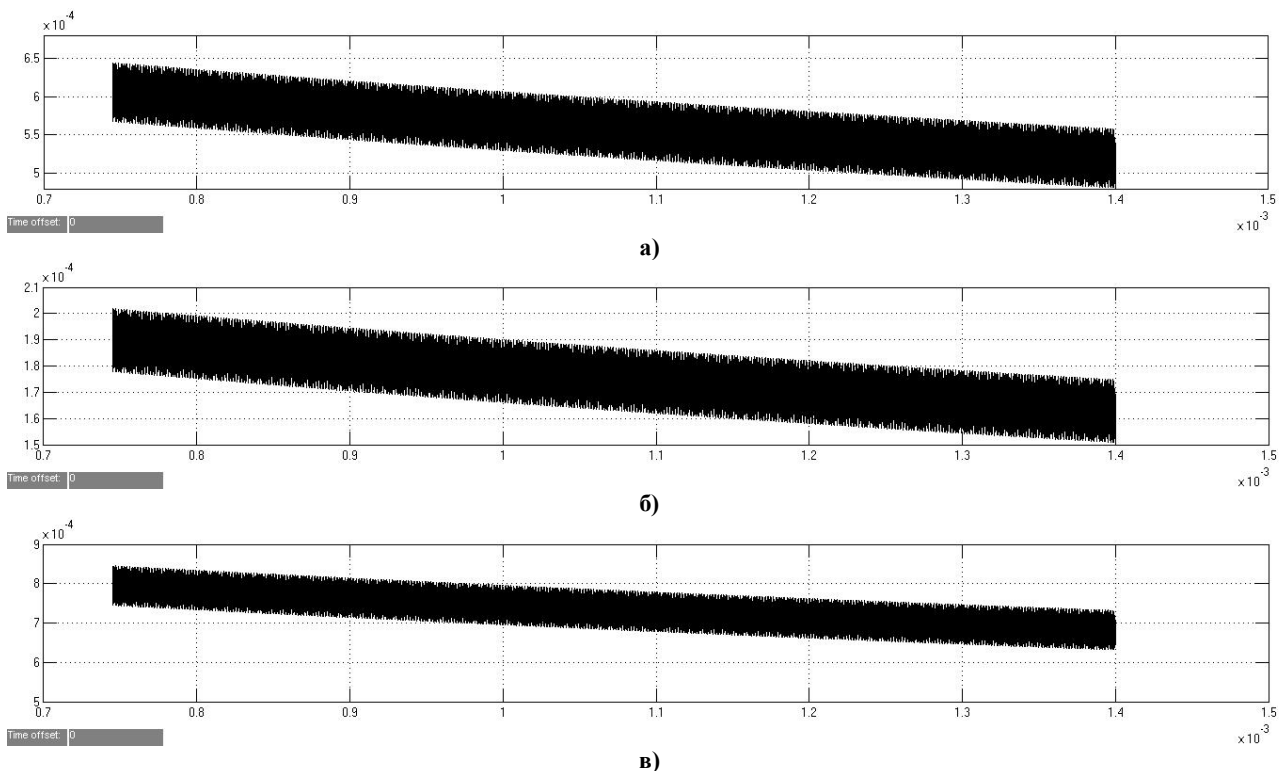


Рис. 6. Графіки зміни в часі: а) – пружної $z_{m,пр}$ б) – пластичної $z_{m,пл}$, в) – загальної z_m деформацій твердої фази оброблюваного матеріалу під час його попереднього віброударного зневоднення у прес-формі закритого типу на гідроімпульсному вібропресі

Аннотация. В статье приведены схема виброударного инерционного нагружения влажного дисперсного материала в процессе его предварительного виброударного обезвоживания на гидроимпульсном вибропрессе в пресс-форме закрытого типа, безинерционные реологические модели материала при реализации данного нагружения, а также составленные на основе схемы и моделей уравнения, связывающие рабочие параметры процесса, физико-механические характеристики обрабатываемого материала и конструктивные параметры вибропресса. С использованием составленных уравнений, в среде Matlab Simulink разработана программа, рассчитаны и построены графики изменения во времени деформаций твердой и жидкостной фаз материала на этапе его наиболее интенсивного виброударного нагружения. Представленные в статье уравнения могут послужить основой для разработки методики проектного расчета гидроимпульсного оборудования для виброударного обезвоживания.

Ключевые слова: реологические модели, влажный дисперсный материал, гидроимпульсный вибропресс, виброударное нагружение.

Abstract. Purpose. Compilation of equations, that links the working parameters of process of vibro-blowing loading of humid dispersive material in a process of its dehydration on hydraulic-pulse vibropress in closed-type press-form, the physico-mechanical features of the processed material and constructive parameters of vibropress.

Method/methodology/approach. The designed by author the scheme of vibro-blowing inertia loading of processed material in closed-type press-form, uninertia springy-viscous-plastic rheological models of the material, developed with taking into account the dry friction between hard particles, their interaction with particles of the liquid phase and presence in a material of the free liquid; the equations of the motion executive elements of vibropress, equation of the conservation of their pulse, equation of the balances of energy, equations of the motion of hard and liquid particles of the processed material, rheological equation of the change of strains and deformations of hard and liquid phases of the material in process of its vibro-blowing loading.

Findings. Equations, that presented in article, will allow to create in a further the methods of the design calculation of hydraulic-pulse equipment for vibro-blowing dehydration of humid dispersive materials, in that number the waste of food production (alcohol bard, beer grain, beet pulp, coffee and barley slime). Using that equipment will allow to solve a problem of salvaging of the waste.

Originality/value. Using of the equations, that presented in article, will allow to calculate the optimum constructive parameters of hydraulic-pulse equipment for vibro-blowing dehydration of humid dispersive materials, coming from their physico-mechanical features and parameters of loading, providing herewith maximum capacity of working process, its minimum energy-capacity and necessary final moisture of the processed material.

The keywords: rheological models, humid dispersive material, hydraulic-pulse vibropress, vibro-blowing loading.

Список літератури

1. *Іскович-Лотоцький Р. Д.* Аналіз способів сепарування вологих дисперсних матеріалів та обладнання для їх реалізації/ *Р. Д. Іскович-Лотоцький, І. В. Севостьянов* // Вісник національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Машинобудування, 2009. – Випуск №57. – С. 50 - 55.
2. *Кузнецов О. А.* Реология пищевых масс: Учебное пособие/ *Кузнецов О. А., Волошин Е. В., Сагитов Р. Ф.* – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. - 106 с.
3. *Севостьянов І. В.* Методика проектного розрахунку гідроімпульсного вібропреса для попереднього потокового віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів/ *Севостьянов І. В., Іскович-Лотоцький Р. Д., Любин В. С.* // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні і приладобудуванні, 2011. – Вип. 45. - С. 346 - 353.
4. *Севостьянов І. В.* Математичне моделювання процесів віброударного сепарування вологих дисперсних матеріалів/ *І. В. Севостьянов, Р. Д. Іскович-Лотоцький* // Вібрації в техніці та технологіях, 2008. - №2. - С. 39 – 45.
5. *Лыков А. В.* Теория сушки/ *Лыков А. В.* – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
6. *Іскович-Лотоцький Р. Д.* Основи теорії розрахунку та розробка процесів і обладнання для віброударного пресування. Монографія/ *Іскович-Лотоцький Р. Д.* – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2006. – 338 с.
7. *Гончаревич И. Ф.* Вибрационная техника в пищевой промышленности/ *Гончаревич И. Ф., Урьев И. Б., Талейсник М. А.* – М.: Пищевая промышленность, 1977. – 279 с.
8. *Севостьянов І. В.* Особливості віброударного зневоднення продуктів переробних виробництв/ *Севостьянов І. В., Іскович-Лотоцький Р. Д., Поліщук О. В.* // Наукові нотатки. Межвузівський збірник (за напрямом «Інженерна механіка»), 2007. – Випуск 20. – С. 443 – 446.
9. *Іскович-Лотоцький Р. Д.* Розрахунок параметрів вібропресового обладнання з гідроімпульсним приводом для зневоднення вторинних продуктів переробних та харчових виробництв/ *Р. Д. Іскович-Лотоцький, І. В. Севостьянов* // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, 2007. - №3. – Ч. 1. – С. 105 – 108.
10. *Башта Т. М.* Гидравлика, гидромашины и гидроприводы/ *Т. М. Башта, Б. Б. Некрасов.* – М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.
11. *Іскович-Лотоцький Р. Д.* Обґрунтування ефективності застосування віброударних та вібраційних процесів в харчовій переробній промисловості/ *Іскович-Лотоцький Р. Д., Поліщук О. В., Севостьянов І. В.* // Вібрації в техніці та технологіях, 2008. - №3. - С. 78 – 82.

REFERENCES

1. *Iskovich-Lotoc'kij R. D., Sevost'janov I. V.* Analiz sposobiv separuvannja vologih dispersnih materialiv ta obladnannja dlja ih realizacii. Visnik nacional'nogo tehnicnogo universitetu Ukraїni "Kiїvs'kij politehnicnij institut". Mashinobuduvannja. [The analysis of methods of separation of humid dispersive materials and equipment for it's realization. Journal of Mechanical Engineering of NTUU «KPI»], 2009, No 57, pp. 50-55.
2. *Kuznecov O. A., Voloshin E. V., Sagitov R. F.* Reologija piwevyh mass: Uchebnoe posobie [Rheology of the food masses] . Orenburg: GOU OGU, 2005, 106 p.
3. *Sevost'janov I. V., Iskovich-Lotoc'kij R. D., Ljubin V. S.* Metodika proektnogo rozrahunku gidroimpul'snogo vibropresa dlja poperedn'ogo potokovogo vibroudarnogo znevodnennja vologih dispersnih materialiv. Avtomatizacija virobnicnih procesiv u mashinobuduvanni i priladobuduvanni [The methods of design calculation of hydraulic-pulse vibropress for preliminary flow vibro-blowing dehydration of humid dispersive materials. The automation of production processes in a mechanical engineering and device engineering], 2011, No. 45, pp. 346 - 353.
4. *Sevost'janov I. V., Iskovich-Lotoc'kij R. D.* Matematichne modeljuvannja procesiv vibroudarnogo separuvannja vologih dispersnih materialiv. Vibracii v tehnicі ta tehnologijah [The mathematical modeling of the processes of vibro-blowing separation of humid dispersive materials. The vibrations in the technique and technologies], 2008, No 2, pp. 39 – 45.
5. *Lykov A. V.* Teorija sushki [Theory of draining]. Moscow: Jenergija, 1968, p. 472.
6. *Iskovich-Lotoc'kij R. D.* Osnovi teorii rozrahunku ta rozrobka procesiv i obladnannja dlja vibroudarnogo presuvannja. Monografija [Bases of calculation's theory and elaboration of processes and equipment for vibro-blowing pressing]. Vinnicja: UNIVERSUM, 2006, 338 p.
7. *Goncharevich I. F., U'rev I. B., Talejsnik M. A.* Vibracionnaja tehnika v piwevoj promyshlennosti [The vibrating technique in a food industry]. Moscow: Piwevaja promyshlennost', 1977, p. 279.
8. *Sevost'janov I. V., Iskovich-Lotoc'kij R. D., Poliwuk O. V.* Osoblivosti vibroudarnogo znevodnennja produktiv pererobnih virobniciv. Naukovi notatki. Mezhvuzivs'kij zbirnik (za naprjamom «Inzhenerna mehanika») [The peculiarities of vibro-blowing dehydration of the products of processed productions. Scientific articles], 2007, No 20, pp. 443 – 446.
9. *Iskovich-Lotoc'kij R. D., Sevost'janov I. V.* Rozrahunok parametriv vibropresovogo obladnannja z gidroimpul'snim privodom dlja znevodnennja vtorinnih produktiv pererobnih ta harchovih virobniciv. Visnik Shidnoukraїnskogo nacional'nogo universitetu imeni Volodimira Dalja [The calculation of parameters of vibropressing equipment with the hydraulic-pulse drive for dehydration of recyclable products of processed and food productions. The bulletin of West-Ukrainian national Volodir Dal university], 2007, №3, Part 1, pp. 105 – 108.
10. *Bashta T. M.* Mashinostroitel'naja gidravlika [Machinery hydraulic]. Moscow: Mashinostroenie, 1971, 672 p.
11. *Iskovich-Lotoc'kij R. D., Poliwuk O. V., Sevost'janov I. V.* Obgruntuvannja efektnosti zastosuvannja vibroudarnih ta vibracijnih procesiv v harchovij pererobnij promislovosti. Vibracii v tehnicі ta tehnologijah [Substantiation of the effectiveness of using vibro-blowing and vibrating processes in the food processing industry. The vibrations in the technique and technologies], 2008, No3, pp. 78 – 82.