

ПЕНТЮК Борис Миколайович, канд. техн. наук, доцент, докторант



Народився 23.02.1955 р.

Закінчив Вінницький політехнічний інститут в 1976 р., в 1985 р. захистив кандидатську дисертацію.

Нагороджений знаком "Винахідник СРСР" (1982 р.). Лауреат премії НТО (1982 р.), в 1987 р. отримав медаль Академії наук УРСР для молодих вчених.

З 1990 р. доцент Вінницького національного технічного університету.

Автор понад 120 праць, серед них 25 авторських свідоцтв та 15 патентів України, 1 монографія.

Основні напрямки наукової діяльності: моделювання та дослідження робочих процесів вібропресового обладнання для виробництва виробів із порошкових матеріалів.

УДК 666.972 + 666.983

ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЗАЄМОДІЇ РОБОЧОГО ОРГАНУ ВІБРОПРЕСА З ОБРОБЛЮВАЛЬНИМ ПОРОШКОВИМ МАТЕРІАЛОМ ПРИ РІЗНИХ ІМПУЛЬСНО-СИЛОВИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

На процес взаємодії робочого органу вібропресу (РОВО) з оброблюваним порошковим матеріалом (ПМ) великий вплив здійснює та характеристика опору, яка визначається фізико-механічними властивостями ПМ та видом навантаження.

У вібропресах, які пресують ПМ у прес-формі, у результаті взаємодії РОВО з ПМ, в останньому в основному генеруються стандартні різновиди форм: близькі до трикутної чи трапецевидної. У зв'язку з цим аналіз процесу взаємодії РОВО з ПМ й виникнення таких хвиль, а також пошук їх раціональних параметрів, при котрих забезпечується найкраща передача енергії до ПМ є задачею актуальною.

Дослідження впливу параметрів хвилі деформації на ефективність передачі її енергії у оброблюване ПМ-середовище почнемо з найбільш простого випадку, коли хвиля має трикутну форму (рис. 1).

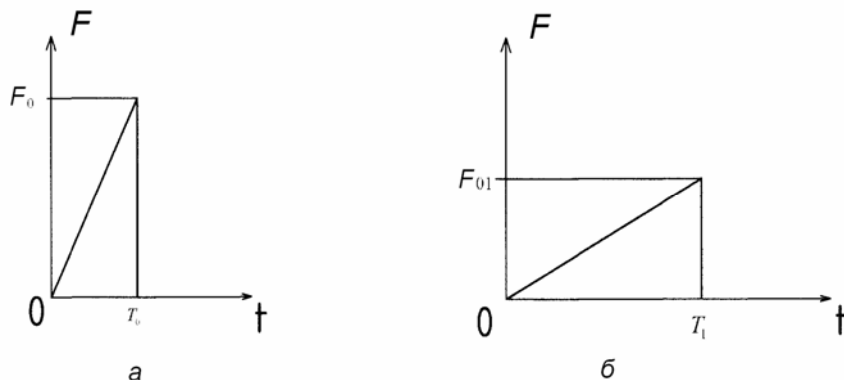


Рис. 1 Діаграми зміни зусиль у хвилях деформації, що діють на ПМ у прес-формі з боку РОВО:

а – при $T = T_0$; б – при $T = T_1, T_1 > T_0$

Нехай зусилля у початковій хвилі, що діє на ПМ, зростають з плином часу від нуля до деякої величини F_0 (F_{01}) за час T_0 (T_1). Залежність зусиль у хвилі від часу можна описувати функцією виду:

$$F_0 = -F_0 \cdot \left(\frac{t}{T_0} \right), \text{ або } F_{\text{інстр.}} = -F_{01} \cdot \left(\frac{t}{T_1} \right), \quad (1)$$

де $F_{p.o}$ - зусилля робочого органу (Р.О.) вібропреса; T_{01} - тривалість хвилі. Енергія цієї хвилі визначається з залежності:

$$W_{\text{хвилі}} = \frac{F_0^2 \cdot T_0}{3C}, \text{ або } W_{\text{хвилі}} = \frac{F_{01}^2 \cdot T_1}{3C}, \quad (2)$$

де C - ударна пружність РОВ, яка за своєю фізичною сутністю характеризує зміну пружності у часі.

При дії РОВ на ПМ, зусилля, які розвиваються у контакті РОВ з ПМ, змінюються у відповідності із залежністю:

$$\begin{cases} F_K = 2F_0 \cdot \left[\frac{1}{S_0} \cdot \left(1 - e^{-\frac{S_0 \cdot t}{T_0}} \right) - \frac{t}{T_0} \right], \text{ або} \\ F_K = 2F_{01} \cdot \left[\frac{1}{S_1} \cdot \left(1 - e^{-\frac{S_1 \cdot t}{T_1}} \right) - \frac{t}{T_1} \right], \end{cases} \quad (3)$$

де $S_0 = \frac{k \cdot T_0}{C}$, $S_1 = \frac{k \cdot T_1}{C}$, k - пружність контакту РОВ з ПМ. Зазначимо, що $[C] = H \cdot \text{сек}/\text{м}$, $[k] = H / \text{м}$.

Зусилля у хвилі деформації, яка відбивається від пресуемого ПМ при дії на нього РОВ, визначається з виразу:

$$\begin{cases} F_{\text{відбитоїхвилі}} = 2F_0 \cdot \left[\frac{1}{S_0} \cdot \left(1 - e^{-\frac{S_0 \cdot t}{T_0}} \right) - 0.5 \frac{t}{T_0} \right], \text{ або} \\ F_{\text{відбитоїхвилі}} = 2F_{01} \cdot \left[\frac{1}{S_1} \cdot \left(1 - e^{-\frac{S_1 \cdot t}{T_1}} \right) - 0.5 \frac{t}{T_1} \right], \end{cases} \quad (4)$$

На рис. 2 наведені діаграми залежностей (3), отримані при $S=0,5$, а також якісні діаграми зміни параметру F_K за іншого значення параметру S .

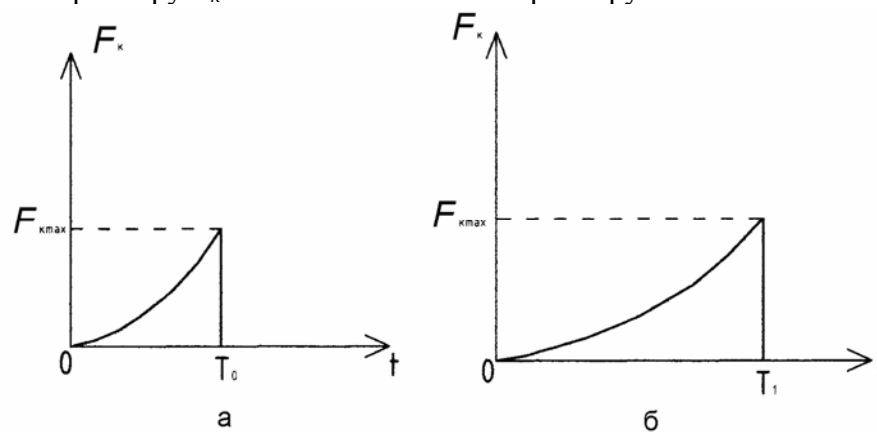


Рис. 2 Діаграми залежності $F_K(t)$:
а) $S=0,5$; б) $S>0,5$

На рис. 3 наведені діаграми залежності (4), отримані при $S=0,5$, а також якісні діаграми зміни параметру F відбитої хвилі від ПМ (назад у РОВ) за іншого значення параметру S ($S>0,5$).

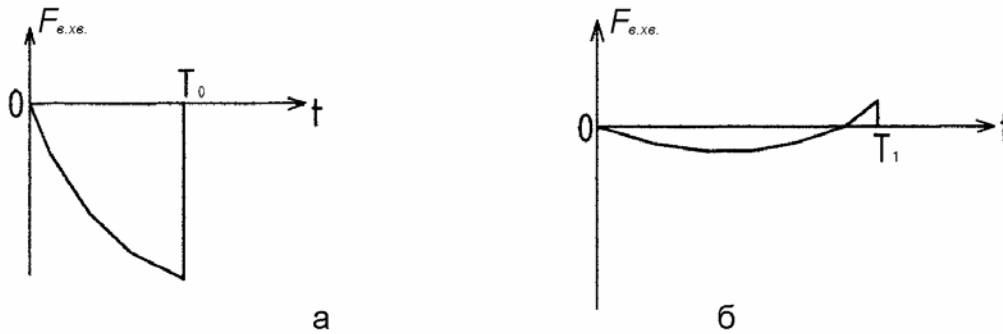


Рис. 3 Діаграми залежності F відбитої хвилі (t):
а) $S=0.5$; б) $S>0.5$

З аналізу залежностей (3) і (4) випливає, що навантаження РОВ на ПМ відбувається на протязі усього терміну дії на ПМ хвилі деформації зі зростаючими зусиллями. Тоді саме величини навантаження й зусиль у контактному перерізі РОВ з ПМ досягають максимального значення у момент часу $t=T$. Підставляючи це значення часу у формулу (3), знайдемо:

$$\begin{cases} F_{k \max} = -2F_0 \cdot \left[1 - \frac{1}{S_0} \cdot (1 - e^{-S_0}) \right], \\ F_{k \max} = -2F_0 \cdot \left[1 - \frac{1}{S_1} \cdot (1 - e^{-S_1}) \right], \end{cases} \quad (5)$$

Із рис. 3 слідує, що у початковий період впливу хвилі на оброблюваний ПМ від нього відбивається хвиля розтягу, зусилля у котрій з плином часу зростають. Це відбувається тому, що інтенсивність зростання опору ПМ у початковий період навантаження у нього РОВ менше, ніж інтенсивність зростання зусиль у хвилі, яка діє на ПМ. При $S=0.5$ ця умова виконується на протязі усього часу дії на РОВ початкової хвилі деформації (див. рис. 3, а).

Якщо ж інтенсивність зростання сили опору зі сторони ПМ більше, ніж зусилля у хвилі, яка діє на РОВ, то зусилля у відбитій хвилі зменшуються (див. рис. 3, б). При виконанні умови $F_k = F_{\text{інстр}}$ відбиття хвилі від оброблюваного ПМ не відбувається ($F_{\text{відбитої хвилі}}=0$), а при $F_k > F_{\text{інстр}}$ від ПМ відбивається хвиля пресування. Останнє має місце при значеннях $S = \frac{kT}{C} > 1.6$.

Хвиля розтягу, відбита від оброблюваного ПМ, розповсюджується у РОВ до його ударного перерізу й, впливаючи на цей переріз, переміщує його у бік ПМ. Якщо ударний переріз РОВ вільний, то ця хвиля відбивається від нього хвилею пресування (рис. 4). При цьому хвильова форма залишається незмінною, а залежність зусиль у цій хвилі від часу знаходиться як $F_{p.o.}(2t) = -F_{e.xv.}(t)$.

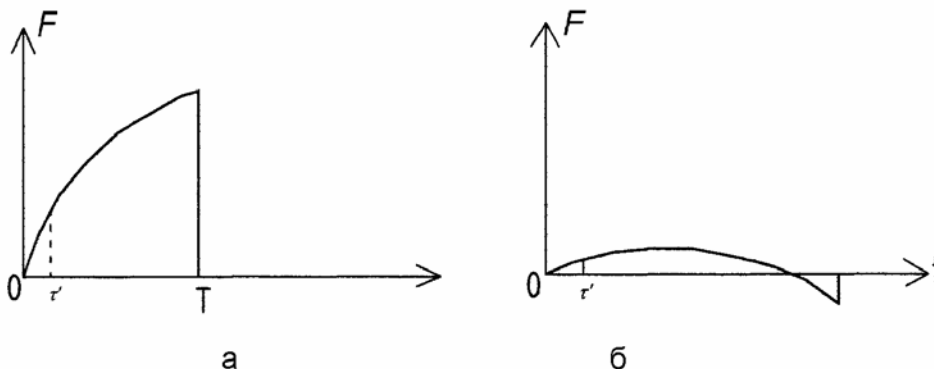


Рис. 4 Діаграма зміни зусиль у хвилі деформацій, що підходить повторно з боку РОВ до ПМ:
а) $S=0.5$; б) $S>0.5$

Таким чином, хвиля розтягу, відбита від оброблюваного ПМ, знову повертається до нього хвилею пресування.

Якщо зусилля у цій хвилі достатні для подолання опору ПМ, то відбувається повторне навантаження РОВ на ПМ. Умова, за якої має місце повторне навантаження, записується у вигляді:

$$F_{k1\max} < 2F_{p.o.2}$$

де $F_{k1\max}$ - максимальне зусилля, що утворюється у контакті РОВ з ПМ при першому навантаженні.

Аналіз залежностей (4), (5) показує, що повторне навантаження можливе тільки при значеннях $S < 0.9$.

Дослідження процесу впливу хвилі трапецевидної форми на оброблюваний методом вібропресування (віброударного пресування) ПМ почнемо з окремого випадку, коли хвиля має прямокутну форму.

На рис. 5 у якості прикладу показані хвилі деформації, що впливають на оброблюваний ПМ (а,в) й відбиваються від нього (б,г) при першій дії РОВ (а,б) та при повторній (в,г). Ці хвилі побудовані при значенні параметру $S=0,5$.

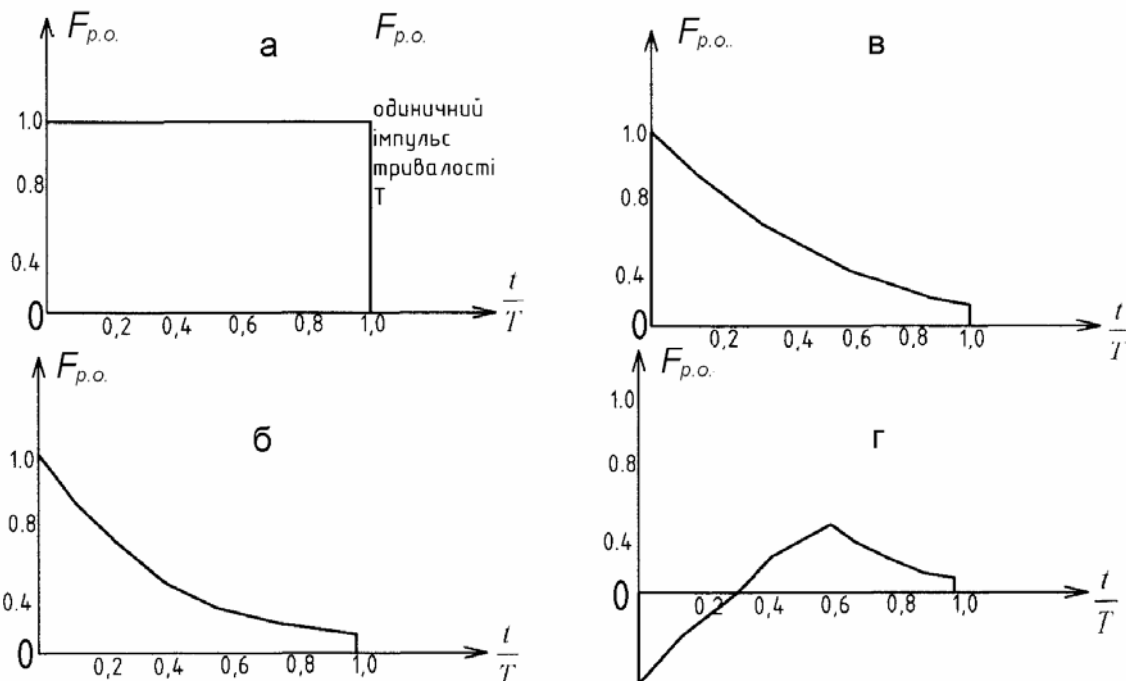


Рис. 5. Хвилі деформації, діючі на оброблюваний ПМ (а,в) й відбиті від нього (б,г), при першому (а,б) й повторному (в,г) навантаженні РОВ; $S=0,5$

Важливою обставиною є те, що прямокутна хвиля формується найпростішим за конструкцією РОВ, що представляє собою стрижень рівного з ПМ у прес-формі поперечного перерізу, тоді як формування хвиль деформацій трикутної форми вимагає застосування спеціальних схем керування рухом РОВ досить складної конструкції (або сам РОВ повинен мати складну конфігурацію перерізу), особливо при забезпеченні тривалості наростання зусиль у хвилі, більших тривалості їх спадання.

У реальних вібропресах для ущільнення ПМ, що працюють у віброударному режимі навантаження, за допомогою звичайних РОВ практично не вдається сформувати хвилю деформацій прямокутної форми.

Для опису процесу взаємодії хвилі деформації трапецевидної форми з оброблюваним ПМ розділимо її на три ділянки (рис. 6).

Зміна зусиль у хвилі деформації від часу на кожній ділянці описується наступними залежностями:

$$\begin{cases} F_{p.o.1} = -F\left(\frac{t}{T_1}\right), 0 < t < T_1; \\ F_{p.o.2} = -F, 0 < t < T_2; \\ F_{p.o.3} = -F\left(1 - \frac{t}{T_3}\right), 0 < t < T_3. \end{cases} \quad (6)$$

На кожній ділянці хвилі відлік часу ведеться від початку ділянки.

На рис. 6 зображена хвиля трапецевидної форми з таким співвідношенням параметрів: $T_3 = 2T_1$; $T_2 = T_1$; $S_1 = S_2$; $S_3 = 0,8$.

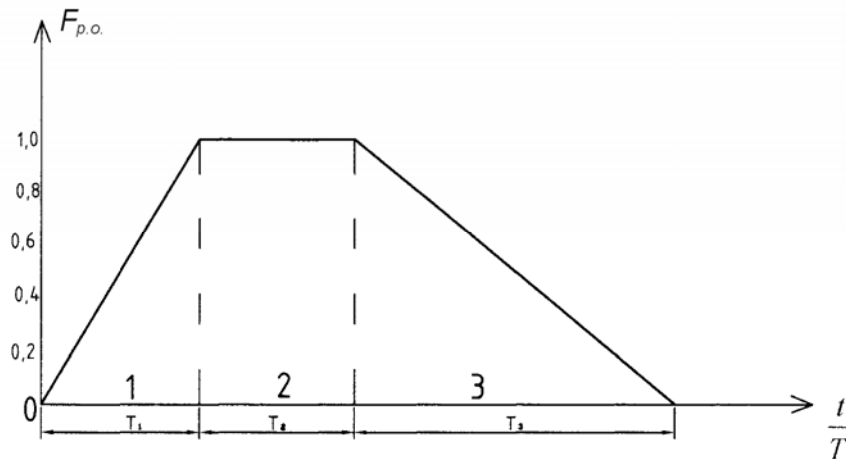


Рис. 6. Хвиля деформації трапецевидної форми

Вибір тої чи іншої хвилі імпульсно-силового навантаження потребує розгляду практичної реалізації її РОВ та визначення критерія ефективності і за його значенням порівнювати реальні форми хвиль, що і є задачею вибору раціональних форм хвиль деформації.

Задача вибору раціональної форми хвилі навантаження РОВ на оброблюваний ПМ за умов віброударної технології пресування середовища може розв'язуватись двома шляхами [1,2]: формуванням за допомогою схеми управління рухом параметрами самого РОВ, які забезпечують найбільшу передачу енергії до ПМ при відомій характеристиці опору ПМ при його деформації, а також формуванням раціональної характеристики опору ПМ РОВ за заданих параметрів хвилі деформації. Перше досягається вибором відповідної схеми й способу управління рухом РОВ, а друге – вибором відповідних параметрів самого РОВ для конкретного виду виробів з ПМ (маються на увазі фізико-механічні та конструктивні параметри самого РОВ).

Розглянемо далі детальніше питання визначення раціональних параметрів хвиль деформацій за відомою характеристики опору ПМ.

При цьому візьмемо більш узагальнений випадок (у порівнянні з тим, який використовувався для знаходження раціональних параметрів хвиль деформацій, коли вважали, що опір ПМ при взаємодії з ним РОВ описується суто лінійною функцією). Тепер залежність опору середовища щодо дії на нього РОВ має кусочно-лінійний вигляд.

Вважатимемо, що РОВ з постійною по своїй довжині ударною пружністю C щодо оброблюваного ПМ розповсюджується хвиля деформації (у контактній зоні з ПМ), зміна зусиль у котрій описується деякою функцією $F(z,t)$. При дії РОВ, що знаходиться у контакті з ПМ, відбувається його переміщення з опором, характеристика якого представлена на рис. 7.

Розглянемо, яким чином повинні змінюватись зусилля у хвилі, діючій на ПМ, щоб при взаємодії з ним РОВ на j -ій ділянці діаграми $R(x)$ не відбувалось відбиття хвилі деформації від оброблюваного ПМ.

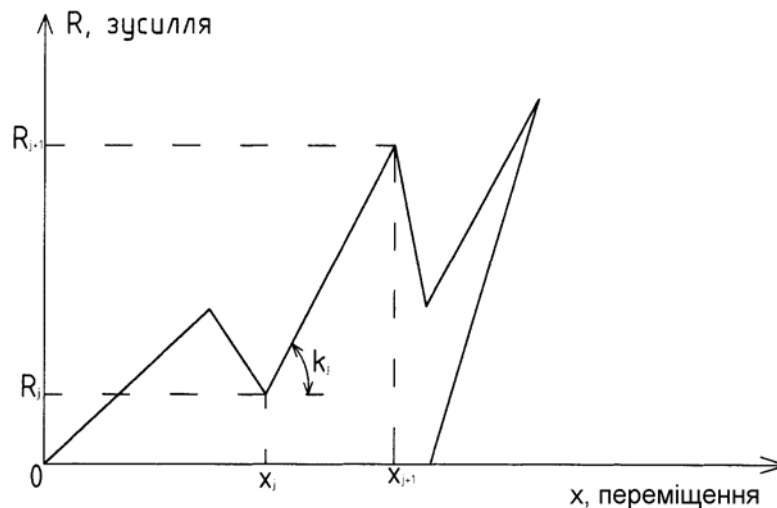


Рис. 7. Залежність опору ПМ від величини навантаження РОВ

Опір середовища на j -ій ділянці описується залежністю:

$$x_j < x < x_{j+1}, R = R_j + k_j \cdot (x - x_j), \quad (7)$$

де k_j - коефіцієнт, що характеризує жорсткість ПМ на j -ій ділянці навантаження; x - переміщення контактної поверхні РОВ та ПМ (величина деформації); R_j, x_j - значення сили опору ПМ й величини навантаження на початку j -ої ділянки.

Вважатимемо, що переміщення перерізів РОВ описується одновимірним хвильовим рівнянням. Записуючи розв'язок цього рівняння за методом Даламбера й враховуючи, що при раціональній формі початкової хвилі її відбиття від ПМ не відбувається, тобто $\varphi(at + z) = 0$, отримаємо:

$$x(z, t) = f(at - z) \quad (8)$$

Гранична умова у контактному перерізі РОВ та ПМ ($z=0$) має вид:

$$E \cdot S \cdot \left(\frac{\partial x}{\partial z} \right) + R_j + k_j (x - x_j) = 0 \quad (9)$$

підставляючи у цю умову вираз (8), після перетворень одержимо неоднорідне лінійне диференціальне рівняння:

$$f'(\xi) - b_j \cdot f(\xi) = b_j \cdot (R_j / k_j - x_j), \quad (10)$$

де $\xi = a \cdot t, b_j = k_j / (ES)$.

Розв'язок рівняння (10) є функція:

$$f(\xi) = A + B \cdot e^{-b_j \cdot \xi} + R_j / k_j - x_j, \quad (11)$$

Визначаючи постійні A та B з початкових умов:

$$x(0, t_j) = f(at_j) = x_j, F(0, t_j) = -ES \cdot f'(at_j) = R_j, \quad (12)$$

де t_j - час, що відповідає початку навантаження на ділянці j , отримаємо:

$$A = 2 \cdot (x_j - R_j / k_j), B = \left(\frac{R_j}{k_j} \right) \cdot e^{b_j at_j}. \quad (13)$$

тоді, враховуючи, що аргумент ξ може приймати довільні значення, запишемо розв'язок рівняння (10) у вигляді:

$$x(z, t) = x_j - \left(\frac{R_j}{k_j} \right) \cdot \left(1 - e^{b_j \cdot a \cdot \left(t - t_j - \frac{z}{a} \right)} \right) \quad (14)$$

Зусилля у контактному перерізі РОВ й ПМ визначається з попереднього виразу, як:



$$F(0, t) = ES \cdot \frac{\partial x}{\partial z} = R_j \cdot e^{b_j a(t-t_j)} \quad (15)$$

Введемо нову змінну $\tau = t - t_j$, тобто перенесемо початок відліку часу у точку вісі часу, яка відповідає початку навантаження РОВ на j -ій ділянці. Тоді вираз (15) можна перетворити до виду:

$$0 < \tau < T_j, F(0, t) = R_j \cdot e^{k_j \tau / c}, \quad (16)$$

де T_j - загальна тривалість навантаження РОВ у ПМ на j -ій ділянці, яка визначається з умови:

$$F(0, T_j) = R_{j+1} \quad (17)$$

R_{j+1} - зусилля у контактному перерізі в кінці j -ої ділянки навантаження.

Підставляючи (17) у рівність (16), знайдемо:

$$T_j = \left(\frac{C}{k_j} \right) \cdot \ln \left(\frac{R_{j+1}}{R_j} \right) \quad (18)$$

Оскільки при відсутності відбитої хвилі від оброблюваного середовища ПМ зусилля у контактному перерізі РОВ з ПМ рівні зусиллям у хвилі, діючій на РОВ, то формула (16) визначає величину зусиль у раціональній хвилі на ділянці навантаження j , а формула (18) – тривалість навантаження РОВ на цій ділянці.

Послідовна побудова оптимального силового впливу на ПМ на різних ділянках навантаження дозволяє знайти узагальнену залежність зусиль від часу для хвилі деформації, діючої на оброблюваний ПМ.

Висновки:

1. Сформульовані основні положення для визначення силових характеристик взаємодії системи «робочий орган – оброблювальний матеріал».
2. Отримані аналітичні залежності, що дозволяють розраховувати силові параметри процесу взаємодії робочого органу преса та порошкового матеріалу при різних формах навантаження.
3. У системах з малою довжиною РОВ (у напрямку осі пресування), за яких згасання другої хвилі, що впливає на ПМ, надто мале й ним можна знехтувати, доцільно вибирати тривалість хвилі таким чином, щоб значення параметру S_0 знаходились у діапазоні 0,25...1,0. Саме для цих значень можна чекати збільшення коефіцієнту передачі енергії з боку РОВ у середовище (ПМ) η за рахунок повторної взаємодії їх між собою, а значить, повторного розповсюдження у ПМ хвиль деформації.
4. У системах вібропресування (віброударного пресування) ПМ, де згасання відбитої хвилі, яка повертається назад до оброблюваного ПМ від РОВ, незначне, хвиля трикутної форми забезпечує, як правило, більшу передачу енергії у оброблюване середовище (лише у системах з великим затуханням відбитої хвилі й при $S < 2$ перевагу слід надавати хвилі деформації прямокутної форми).

Література

1. *Пентюк Б.М.* Високоєфективні машини і процеси у керамічному виробництві: Монографія. – К.: "МП Леся", 2005. – 240 с.
2. *Пентюк Б.М.* Теоретичні дослідження робочих процесів системи "прес – середовище" при її дискретному моделюванні.// Техніка будівництва. – 2004. – № 15. С.45-53