



УДК 693.548.4.001.5

В.Й. Сівко, д.т.н., професор КНУБА  
М.П. Кузьмінець, к.т.н., доцент КНУБА

## ДИНАМІЧНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ВИРОБІВ

**АНОТАЦІЯ.** Викладена методика вдосконалення динамічних параметрів касетних установок, що отримала практичну перевірку і задовільну оцінку у виробничих умовах. Це дозволило удосконалити технологію виготовлення виробів у касетних установках за рахунок оптимізації напружено-деформованого стану бетонної суміші в робочій зоні та розробки принципової схеми збудження коливань роздільного листа і збільшення його динамічних параметрів.

Ключові слова: касетна установка, бетон, віброформування, напружено-деформований стан

**АННОТАЦИЯ.** Изложенная методика совершенствования динамических параметров касетных установок, которая получила практическую проверку и удовлетворительную оценку в производственных условиях. Это позволило усовершенствовать технологию изготовления изделий в касетных установках за счет оптимизации напряженно-деформированного состояния бетонной смеси в рабочей зоне и разработки принципиальной схемы возбуждения колебаний раздельного листа и увеличения его динамических параметров.

Ключевые слова: касетная установка, бетон, виброформирование, напряженно-деформированное состояние.

**ANNOTATION.** Expounded method of perfection of dynamic parameters of the cassette settings, which got practical verification and satisfactory estimation in production terms. It allowed to perfect technology of making of wares in the cassette settings due to optimization of the tense-deformed state of concrete mixture in a working area and development of principle chart of excitation of vibrations of separate letter and increase of his dynamic parameters.

Keywords: cassette setting, concrete, vibroforming, tense-deformed state.

**Вступ.** Касетні установки отримали широке застосування для формування виробів у будівництві, при виготовленні панелей, перегородок, внутрішніх стін, плит перекриттів. Конструктивно касетні установки є набором роздільних листів і парових відсіків, встановлених з зазором на товщину виробу (10...16 см). Бетонна суміш подається в цю вузьку щілину висотою до 2,5 м, причому заповнюючий простір насичений арматурою і конструктивними технологічними деталями: розпірними конусами, закладними елементами, дверними блоками.

**Аналіз досліджень.** Ущільнення суміші відбувається за рахунок коливань розділових листів вібраторами, навішеними на листи збоку (рис. 1).

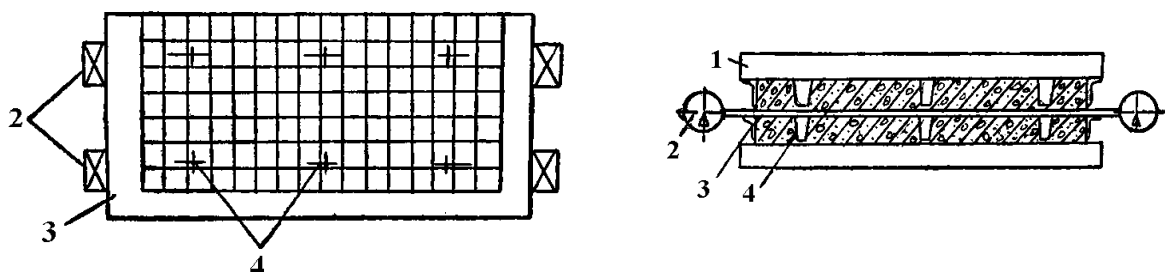


Рисунок 1. Фрагмент касетної установки: 1 – паровий відсік; 2 – віброзбуджувач; 3 – бортоснастка; 4 – розпірні конуси.

Касетна технологія виготовлення залізобетонних виробів характеризується простотою устаткування, високою продуктивністю, але має ряд істотних недоліків: використання рухливих бетонних сумішей (осадка конуса 12...16 см), що призводить до підвищення

витрат цементу; незадовільна в низці випадків якість поверхні виробу, що вимагає додаткових шпаклювальних робіт; неоднорідні міцнісні показники по висоті виробу.

**Постановка проблеми.** Аналіз конструкцій касетних установок і дослідження промислового устаткування показали, що коливання роздільних листів мають нерівномірний характер і малу величину (0,1...0,2 мм). Це не дозволяє домогтися якісного ущільнення бетонної суміші.

**Мета дослідження** 3 метою вдосконалення динаміки роботи касетних установок вивчалися форми власних коливань листів та з бетонною сумішшю, і проводилося дослідження режимів їх роботи, найбільш сприятливих для ущільнення бетону. Враховуючи, що експериментальні дослідження досить трудомісткі, рішення поставленої задачі проводилося експериментально та чисельно.

**Методика досліджень.** Чисельні розрахунки виконані із застосуванням методу скінченних елементів з урахуванням коефіцієнтів впливу, відомих з курсу опору матеріалів, що показують величину прогину від дії одиничного навантаження при розгляді пластини як двомірної балки.

**Основна частина.** Наприклад, для системи з трьома ступенями свободи маємо три коефіцієнта прямого впливу  $\alpha_{11}, \alpha_{22}, \alpha_{33}$ , відповідних одиничним силам і прогинам, вимірюваних у точках прикладання цих сил, і шість коефіцієнтів сполученого впливу  $\alpha_{12}, \alpha_{21}, \alpha_{13}, \alpha_{31}, \alpha_{23}, \alpha_{32}$ , що відповідають різним точкам одиничних сил і вимірюваних прогинів. Центри мас, на які виконано розбиття моделі, зазнають дії сил:

$$m_1\ddot{x}_1, m_2\ddot{x}_2, m_3\ddot{x}_3,$$

де  $m_1, m_2, m_3$  – маси скінченних елементів;  $\ddot{x}_1, \ddot{x}_2, \ddot{x}_3$  – прискорення цих мас.

Прогин під дією цих сил в першій масі дорівнює:

$$x_1 = -\alpha_{11}m_1\ddot{x}_1 - \alpha_{12}m_2\ddot{x}_2 - \alpha_{13}m_3\ddot{x}_3.$$

Аналогічно складемо рівняння для другої та третьої мас:

$$\begin{aligned} x_2 &= -\alpha_{21}m_1\ddot{x}_1 - \alpha_{22}m_2\ddot{x}_2 - \alpha_{23}m_3\ddot{x}_3, \\ x_3 &= -\alpha_{31}m_1\ddot{x}_1 - \alpha_{32}m_2\ddot{x}_2 - \alpha_{33}m_3\ddot{x}_3. \end{aligned}$$

Наведені рівняння описують поведінку даної системи з урахуванням сил інерції і пружних сил, закладених в коефіцієнтах впливу. Під дією змушуючої сили  $P_0 \sin \omega t$ , ( $P_0$  – амплітуда змушуючої сили;  $\omega$  – частота) у першій масі статичні деформації в кожній з мас будуть мати вигляд:

$$\alpha_{11}P_0 \sin \omega t; \quad \alpha_{21}P_0 \sin \omega t; \quad \alpha_{31}P_0 \sin \omega t.$$

Тоді рівняння вимушених коливань матимуть вигляд:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= -\alpha_{11}m_1\ddot{x}_1 = \alpha_{12}m_2\ddot{x}_2 - \alpha_{13}m_3\ddot{x}_3 + \alpha_{11}P_0 \sin \omega t, \\ x_2 &= -\alpha_{21}m_1\ddot{x}_1 - \alpha_{22}m_2\ddot{x}_2 - \alpha_{23}m_3\ddot{x}_3 + \alpha_{21}P_0 \sin \omega t, \\ x_3 &= -\alpha_{31}m_1\ddot{x}_1 - \alpha_{32}m_2\ddot{x}_2 - \alpha_{33}m_3\ddot{x}_3 + \alpha_{31}P_0 \sin \omega t. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Припускаючи, що рішення мають вигляд:

$$x_1 = a_1 \sin \omega t, x_2 = a_2 \sin \omega t, x_3 = a_3 \sin \omega t. \quad (2)$$

де  $a_i$  – амплітуда переміщень.

Після підстановки рівняння (2) в рівняння (1) можна їх навести наступній формі:

$$\left. \begin{aligned} (m_1\alpha_{11} - 1/\omega^2)a_1 + m_2\alpha_{12}a_2 + m_3\alpha_{13}a_3 &= -\alpha_{11}P_0/\omega^2; \\ m_1\alpha_{21}a_1 + (m_2\alpha_{22} - 1/\omega^2)a_2 + m_3\alpha_{23}a_3 &= -\alpha_{21}P_0/\omega^2; \\ m_1\alpha_{31}a_1 + m_2\alpha_{32}a_2 + (m_3\alpha_{33} - 1/\omega^2)a_3 &= -\alpha_{31}P_0/\omega^2. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Тоді визначник цієї системи матиме вигляд:

$$\Delta = \begin{vmatrix} m_1\alpha_{11} - 1/\omega^2, & m_2\alpha_{12}, & m_3\alpha_{13}, \\ m_1\alpha_{21}, & m_2\alpha_{22} - 1/\omega^2, & m_3\alpha_{23}, \\ m_1\alpha_{31}, & m_2\alpha_{32}, & m_3\alpha_{33} - 1/\omega^2. \end{vmatrix} \quad (4)$$

Розклавши визначник (4), отримаємо кубічне рівняння, відоме під назвою «рівняння частот», яке має три корені, які визначають три власні частоти. Кожному з цих рішень відповідають значення амплітуд, які визначають конфігурацію системи при коливанні (форму коливань). Таким чином, маємо три види власних коливань.

Амплітуда деформацій

$$a_1 = \frac{\Delta_{a_1}}{\Delta}; a_2 = \frac{\Delta_{a_2}}{\Delta}; a_3 = \frac{\Delta_{a_3}}{\Delta},$$

де

$$\Delta_{a_1} = \begin{vmatrix} -\alpha_{11}P_0/\omega^2, & m_2\alpha_{12}, & m_3\alpha_{13}, \\ -\alpha_{21}P_0/\omega^2, & m_2\alpha_{22} - 1/\omega^2, & m_3\alpha_{23}, \\ -\alpha_{31}P_0/\omega^2, & m_2\alpha_{32}, & m_3\alpha_{33} - 1/\omega^2. \end{vmatrix} \quad (5)$$

Аналогічно визначаються  $\Delta_{a_2}$  і  $\Delta_{a_3}$ .

Зі збільшенням густоти сітки розбивання моделі на елементи рівняння коливань (1) значно ускладнюються, але точність рішення збільшується. У даній роботі розрахункова модель отримана діленням листа на  $7 \times 16$  скінченних елементів.

Для аналітичного дослідження та розв'язку форм коливань роздільних листів було використано ЕОМ та програми [1] для визначення динаміки і стійкості складних оболонкових і пластинчастих конструкцій в лінійній і нелінійній постановках.

В даному дослідженні розв'язувались наступні задачі: визначення форм власних коливань, розрахунок роздільних листів на примусові коливання в вільному стані, розрахунок коливань в умовах віброформування бетонної суміші, експериментальні визначення амплітуд коливань розподільних листів. Вивчення форм власних коливань показало, що пластина здійснює коливання при 9 - ти власних частотах (12; 14; 15,1; 18,65; 20,5; 23,46; 27,00; 34,00; 45,00 Гц). Аналіз отриманих результатів [1] дозволив установити, що найбільш раціональними будуть коливання по 4-й формі (рис. 2), враховуючи необхідність установа розпірних конусів і забезпечення при цьому найменшої передачі коливань на раму.

Виконано розрахунок власних і вимушених коливань вільної пластини з бетонною сумішшю без урахування і з урахуванням розпірних конусів.

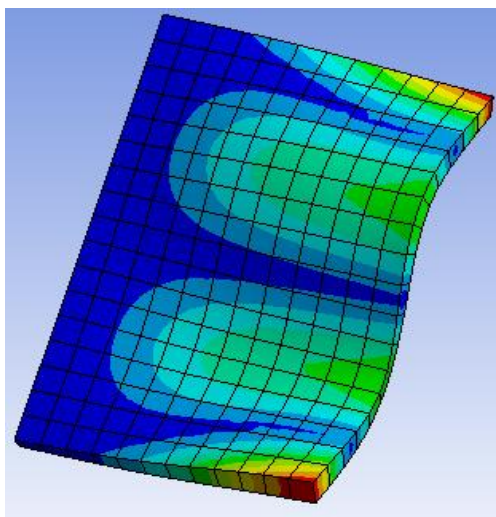


Рисунок 2. Приклад розрахунку власних коливань при частоті 18,65 Гц.

Отримано п'ять частот і відповідних їм форм власних коливань, аналіз яких показав, що найбільш прийнятною з технологічної точки зору є третя форма (табл. 1), що має дві напівхвилі в поздовжньому напрямку з вузловою лінією по середині пластини.

Розрахунок частот власних коливань пластини з урахуванням розпірних конусів показав, що значення частот і відповідних їм форм коливань практично не змінилися.

Таблиця 1.

Власні коливання вільної пластини без розпірних конусів.

| Частота, Гц    | 12,0 | 15,7 | 18,7 | 20,5 | 23,5 |
|----------------|------|------|------|------|------|
| Форма коливань |      |      |      |      |      |

Таблиця 2.

Вільні коливання з урахуванням бетонної суміші.

| Частота, Гц    | 13,51 | 18,65 | 19,97 | 21,06 | 37,34 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Форма коливань |       |       |       |       |       |

Таблиця 3.

Вільні коливання з бетонною сумішшю.

| Частота, Гц    | 24,0 | 36,68 | 43,0 | 49,0 | 62,0 |
|----------------|------|-------|------|------|------|
| Форма коливань |      |       |      |      |      |

Вплив бетонної суміші при коливаннях роздільних листів виконувався при значеннях коефіцієнтів приєднання маси бетону  $\alpha = 0,3$  з двох сторін. Значення частот і форми



власних коливань листа з урахуванням приєднаної маси наведено в табл. 2. У порівнянні з коливаннями вільної пластини, значення частот дещо збільшилися. Можна зробити висновок про те, що бетонна суміш чинить вплив на спектр частот роздільних листів. Однак форми коливань залишилися практично незмінними, з більш чіткими лініями перегину листа.

Форми вимушених коливань пластини з бетонною сумішшю розглядалися при частотах, характерних для заводських умов формувань виробів (24,0; 36,68; 43,0; 49,0; 62,0 Гц). Найбільш часто зустрічається частота 43,0 Гц. З табл. 3 видно, що при цьому є багато точок перегину, що вказують на імовірну причину нерівномірності виробів по об'єму.

Експериментальні дослідження касетних установок виконувалися в натурних умовах, а вимірюванням амплітуд коливань роздільних листів з використанням спеціального віброшупа прикріпленого на телескопічній штанзі та зв'язаного з осцилографом. Така конструкція датчика дозволяла вимірювати динамічний режим практично в будь-якій точці площини листа при різних видах технологічного навантаження. Замір переміщень проводився в точках на висоті 250, 1250 і 2000 мм від верху пластини. На кожному рівні знімалися показання в семи точках: дві 1,1 і 1,7 – за межами робочої зони, на консольних ділянках роздільного листа і п'ять (1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6) – в робочій зоні на рівних відстанях один від одного.

Результати замірів для рівня 250 мм і заповнення відсіків бетоном на одну третину представлені в табл.4.

Таблиця 4.

Вимірюванням амплітуд  $A$  коливань роздільних листів.

| № точки              | 1,1  | 1,2  | 1,3  | 1,4  | 1,5  | 1,6  | 1,7  |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $A$ дослідна, мм     | 0,86 | 0,60 | 0,70 | 0,60 | 0,36 | 0,25 | 0,60 |
| $A$ розрахункова, мм | 1,81 | 0,71 | 0,71 | 0,70 | 0,27 | 0,18 | 0,72 |

Порівнюючи розрахункові і дослідні значення переміщень роздільного листа, неважко зробити висновок, що вони задовільно збігаються (середня похибка становить 18%).

Розбіжність значень для точки 1,1 викликано неможливістю чіткого обліку способу заземлення листа в реальних умовах роботи касетних установок.

### Висновки.

1. Аналіз викладених досліджень дозволив визначити режими коливань роздільних листів і відповідні їм форми, що задовольняють технологічним вимогам підвищення інтенсивності коливань (частоти 46, 48 і 49 Гц).

2. З метою зменшення непродуктивної передачі енергії на парові відсіки і станину машини в цілому і підвищення ефективності амплітуди коливань роздільних листів без суттєвої переробки машин представляється можливим дати рекомендації по розміщенню технологічного оснащення в вузлових лініях.

3. Розроблена методика вдосконалення динамічних параметрів касетних установок отримала практичну перевірку і задовільну оцінку у виробничих умовах виготовлення виробів.

4. Виконані дослідження дозволяють удосконалити технологію виготовлення виробів у касетних установках за рахунок оптимізації напружено-деформованого стану бетонної суміші в робочій зоні касетної установки і розробки принципової схеми збудження коливань роздільного листа і суттєвого збільшення його динамічних параметрів.

### Література

1. Басов К.А. ANSIS в примерах и задачах / Под общ. ред. Д.Г. Красковского. – М.: КомпьютерПресс, 2002. – 224 с.: ил/
2. Сівко В.Й., Кузьмінець М.П. Прикладна механіка робочих процесів машин // Монографія, – К.: НТУ, 2009, – 349 с.