

В.М. Гарнець, к.т.н., проф.;  
Ю.В. Човнюк, к.т.н., проф.;  
О.С. Полторак, аспірант (КНУБА, Київ)

## УЗАГАЛЬНЕНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПОВЕРХНЕВОГО ФОРМУВАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

*АНОТАЦІЯ.* Запропоновано метод моделювання процесів поверхневого формування ЗБК на основі загального енергетичного принципу та методів теорії графів.

*Ключові слова:* моделювання, процес, поверхнєве формування.

*АНОТАЦИЯ.* Предложен метод моделирования процессов поверхностного формирования ЖБК на основе общего энергетического принципа и методов теории графов.

*Ключевые слова:* моделирование, процесс, поверхностное формирование.

*SUMMARY.* Proposed a method for simulation processes of surface forming of RCC based on a common energy principles and techniques of graph theory.

*Key words:* simulation of surface, forming processes.

### Вступ

При визначенні розрахункової моделі складної дискретно-континуальної системи «багатокомпонентний робочий орган – оброблювана бетонна суміш» слід враховувати, що у процесі формування та ущільнення одночасно задіяні декілька механізмів, кожний з яких виконує певну функцію. Обробка суміші за допомогою конкретного механізму визначається як одна з операцій процесу. Результатом виконання операції є зміна густини суміші і, відповідно, зміна її фізико-механічних властивостей.

Узагальнена фізико-механічна модель взаємодії багатокомпонентних робочих органів бетоноформуєчих агрегатів (БФА) з оброблюваною сумішшю повинна враховувати три основні операції [1,2,4]. Поєднання в одній моделі різних за типом моделей окремих операцій, що реалізуються у конструкції БФА, можливе у формі комбінаторної крайової задачі на графі з оцінкою у його вершинах [4,5] питомого енергопоглинання [3] конкретного процесу операції, яка дозволяє визначити основні енергосилові характеристики БФА в цілому.

На основі аналізу принципів конструктивних схем робочих органів БФА і операцій, які виконуються [1,2], усе різноманіття рішень можна звести до трьох основних «операцій-результатів» (взаємодій):

1. Обробка суміші у бункері (накопичен-

ня, рівномірне розподілення у бункері, вібраційна обробка) => подача суміші у форму (транспортування, укладання у форму і рівномірне розподілення).

2. Ущільнення прошарку суміші (вібраційне або безвібраційне) => ущільнений прошарок суміші (операція повторюється при формуванні кожного окремого прошарку).

3. Відпрацювання поверхні виробу (загладжування різними методами з використанням вібрації або без неї) => свіжий відформований виріб.

### Мета і завдання дослідження

У розглянутих вище досить складних системах задача моделювання не може визначатись лише однією операцією, оскільки характер взаємодії і стан будівельної суміші у процесі її виконання суттєво різні.

Метою даної роботи є розробка моделі БФА та процесів, які у ньому реалізуються, на основі загального енергетичного принципу [3,4], суть якого полягає в отриманні максимальної продуктивності операцій за мінімальних енергетичних витратах. Реалізація вказаного принципу досягається шляхом введення енергопоглинаючих властивостей суміші відповідно до етапу її обробки в умови рівності необхідної та виконаної робіт.

### Виклад основного матеріалу

#### Моделювання процесів формування

При виконанні операцій відбувається кількісне накопичення різного роду деформацій суміші за рахунок зовнішньої енергії, яке призводить до якісної зміни вихідного матеріалу. Для кожної з операцій процесу формування повинна виконуватись рівність необхідної та виконаної робіт:

$$\int_0^m \left( W_i \cdot \frac{m_i}{V_i} \right) dm = \int_0^t k_i \cdot P_i dt, \quad (1)$$

де  $W_i$  – енергопоглинаючі властивості середовища при виконанні  $i$ -тої операції;  $m_i$  та  $V_i$  – відповідно маса й об'єм суміші, які сприймають зовнішню енергію при взаємодії з робочим органом;  $k_i$  – коефіцієнт корисної дії  $i$ -того механізму у процесі передачі енергії від джерела потужності  $P_i$  до суміші;  $t_i$  – тривалість  $i$ -тої операції.

Величина енергії, що передається від її джерела до суміші, пропорційна площі робочого органа, який взаємодіє з будівельною сумішшю.

Ліва частина виразу (1) відображає за сутністю кількість енергії, необхідну для забезпечення процесу, а права – мінімальну необхідну потужність джерела, здатну передати необхідну енергію середовищу, яке обробляється. Протягом реалізації різних етапів обробки величина енергопоглинання знижується за рахунок переходу кількості накопичених сумішшю деформацій у її (суміші) якісно новий стан:

$$W_i \cdot \left( \frac{m_i}{V_i} \right) dm = m_i dW_i. \quad (2)$$

Умова (2) по суті відображає нерозривний зв'язок між величинами, які характеризують параметри машини, суміші та режим обробки для даного процесу, і є аналітичною моделлю передачі енергії від джерела до середовища, яке обробляється.

Аналіз етапів протікання кожної з операцій показує, що деякі з них мають загальні ознаки, які дозволяють синтезувати узагальнену розрахункову модель багатоконпонентного робочого органа БФА. Дійсно, при обробленні бетонної суміші вібропротягувальним робочим органом операція в

цілому розділяється на етапи витікання суміші з бункеру, попереднього й завершального ущільнення й загладжування. У бункерах робочих органів реалізується транспортування суміші за рахунок її витікання під дією вібрації та сил тяжіння. Механізми реалізації цієї стадії для в'язкопластичних і сухих (наджорстких) сумішей суттєво різні й описуються різними реологічними моделями.

Етап попереднього ущільнення відбувається у результаті взаємного проникнення зерен у прошарках суміші при поступальному русі профільованої вібраційної лижі, при вертикальному осаджуванні суміші або при зворотно-поступальному перекочуванні роликів у машинах роликоекструзійної (або екструзійно-вібраційної) дії. Характер взаємодії механізмів-компонентів з середовищем ускладнюється, оскільки одночасно відбувається силовий вплив двох механізмів на елемент суміші, яка обробляється.

Третя стадія завершального ущільнення суміші виявляється за своєю сутністю відповідною операцією щодо структури поверхневого прошарку виробу. В цілому ця стадія є реалізацією тієї складової процесу, яку вважають усталеним режимом роботи БФА. Цей термін є прийнятим для застосування при позначенні режиму обробки суміші, у процесі якого механічні властивості останньої змінюються на 10-15%, але досягається це значними витратами енергії, що пов'язане з руйнуванням мікрочасточек повітря або вологи. Від цього залежить її ефективність і, на наш погляд, це може бути досягнуто за рахунок створення напруженої зсуву в об'ємі виробу.

Енергопоглинання оброблюваної суміші у подальшому слід розглядати як мінімально необхідну кількість енергії, що використовується для обробки одиниці маси цієї суміші для виконання тієї чи іншої операції.

Величина енергопоглинання визначається на основі аналізу реологічної моделі суміші, яка є характерною для даного її стану та етапу обробки. У відповідності з цим енергопоглинання суміші для різних етапів її обробки визначається як:

$$W_i = \frac{\sigma_i \cdot \varepsilon_{\sigma_i} + \tau_i \cdot \varepsilon_{\tau_i}}{\rho_i}, \quad (3)$$

де  $\sigma_i$ ,  $\tau_i$  – відповідно нормальні та дотичні напруження;  $\varepsilon_{\sigma_i}$ ,  $\varepsilon_{\tau_i}$  – складові деформації від нормальних і дотичних напружень у прошарку суміші густиною  $\rho_i$ .

Оскільки визначальним для оброблення бетонної суміші є процес ущільнення, який у свою чергу реалізується під дією дотичних напружень, вираз для визначення енергопоглинання враховує цю складову. Цілком зрозуміло, що у багатокомпонентних робочих органах БФА для забезпечення їх ефективної роботи в цілому необхідно, вивчаючи роботу кожного механізму окремо, проводити узгодження їх між собою за технічними і технологічними показниками. Технічно робота окремих механізмів БФА узгоджується за показником продуктивності. Технологічним показником БФА можуть слугувати енергопоглинання суміші і її кінцева щільність у даній операції. Зрозуміло, що величина енергопоглинання після кожної з операцій обробки буде зменшуватись, що відповідає в цілому механізму процесу ущільнення [5].

На етапі витікання суміші з бункеру при коливанні однієї з його стінок енергопоглинання суміші визначається зміною кінетичної енергії центра мас елементарного прошарку вздовж його елементарного переміщення, його деформацією та витратами енергії на подолання існуючих сил тертя.

На етапі віброущільнення за безвідривного руху вібраційного штапу енергопоглинання суміші визначається у межах моделі внутрішнього тертя Є.С. Сорокіна [2].

На етапі загладжування енергопоглинання (питома потужність, необхідна для цієї операції взаємодії робочого органа БФА та поверхні суміші) можна визначити наступним чином:

$$P_{заг} = \sigma_{нит} \cdot S_{конт} \cdot m^{-1} \cdot \sqrt{V_{р.о.}^2 + V_{з.м.}^2} \cdot \frac{H \cdot M}{\kappa 2}, \quad (4)$$

де  $m$  – маса приведенного прошарку суміші, який сприймає енергію робочого органа БФА;  $\sigma_{нит}$  – питома напруження при загладжуванні поверхневого виробу;  $S_{конт}$  –

контактна площа;  $V_{р.о.}^2$ ,  $V_{з.м.}^2$  – відповідно швидкості руху робочого органа та агрегату в цілому.

Математична модель функціонування БФА може бути зведена до наступного. У межах одновимірної постановки задачі взаємодії робочого органа БФА та суміші, яка ним оброблюється, поєднання (сполучення) різних за типом моделей у одній конструкції можливе у формі комбінаторної крайової задачі на графах. Нижче поданий абстрактний опис цієї задачі, для більш чіткого виділення основного комбінаторного принципу побудови з метою системного аналізу.

Таким чином, маємо граф  $\Gamma$ , який включає набір відрізків  $\Gamma_{(k)}$  ( $k \in K$ ) й вершин  $\Gamma^{(n)}$  ( $n \in N$ ).

На кожному відрізку  $\Gamma_{(k)}$  задається векторна функція  $V_{(k)}(x, t)$ , розмірність якої може залежати від  $k$ . У кожній вершині задається векторна функція  $W^{(n)}(t)$ , розмірність якої залежить від  $n$ .

Далі задача аналізу енергопоглинання та моделювання роботи БФА в цілому зводиться до наступного:

1. На кожному відрізку задається оператор  $L_{(k)}$ , діючий на  $V_{(k)}$  (модель відрізка  $\Gamma_{(k)}$ ), який визначає функціональне рівняння для  $V_{(k)}$ :

$$L_{(k)}(V_{(k)}) = F_{(k)}. \quad (5)$$

Зазвичай оператор  $L_{(k)}$  – квазілінійний диференціальний (іноді інтегродиференціальний) оператор еволюційного типу.

2. У кожній вершині задається оператор  $I^{(n)}$  (модель вершини  $\Gamma^{(n)}$ ), який визначає функціональне рівняння для невідомих  $W^{(n)}$ :

$$I^{(n)}(W^{(n)}) = f^{(n)}. \quad (6)$$

3. Далі слід ввести співвідношення інцидентності, які зв'язують невідомі.

Зазвичай їх зручно розбити на дві групи:

А) Умови примикання. Розглянемо відрізок  $\Gamma_{(k)}$ . Нехай його лівий кінець примикає до вершини з номером  $p$ , а лівий – з номером  $q$ . На лівому кінці задається гра-

ничний оператор  $\partial L_{(k)}^{(p)}$ , а на правому – граничний оператор  $\partial L_{(k)}^{(q)}$ . Ці оператори визначають умови примикання:

$$\begin{aligned} \partial L_{(k)}^{(p)}(V_{(k)}, W^{(p)}) &= 0, \\ \partial L_{(k)}^{(q)}(V_{(k)}, W^{(q)}) &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Співвідношення (7) повинні замикати рівняння (5) у тому сенсі, що при заданих  $W^{(p)}$  й  $W^{(q)}$  задача (5), (7) одночасно вирішується (початкові умови, що накладаються, наприклад, на щільність суміші, ми тут вважаємо включеними у визначення оператора  $L_{(k)}$ ).

Б) Балансні співвідношення. Розглянемо вершину  $\Gamma^{(n)}$ , і нехай до неї примикають відрізки з номерами  $i \in J^{(n)}$ . У вершині  $\Gamma^{(n)}$  задаються оператори  $\varphi_{(i)}^{(n)}$ , що діють на невідомі  $V_{(i)}$ , оператор  $\Phi^{(n)}$ , що діє на  $W^{(n)}$ , та рівняння:

$$\sum_i \varphi_{(i)}^{(n)}(V_{(i)}) = \Phi^{(n)}(W^{(n)}), i \in J^{(n)}. \quad (8)$$

Як правило, співвідношення (8) повинно замикати рівняння (6) у тому сенсі, що при заданих  $V_{(i)}$  система (6), (8) є однозначно розв'язуваною. Іноді ця умова (для функціонування БФА – це рівність питомих енергопоглинань у суміші при переході від однієї стадії процесу її формування до іншої) стає надто жорсткою і тоді її слід замінити.

Тепер звернемо увагу на комбінаторний принцип побудови крайової задачі, котрий складається з моделі загального процесу, що реалізується у БФА, як граф складається з відрізків та вершин. Завдяки цьому у межах сформованої вище схеми можна змінювати (варіювати) число відрізків, моделі та ін., причому зміни, що вносяться у загальну конструкцію (модель функціонування БФА), як правило, локальні. Наприклад, при необхідності заміни моделі  $L_{(k)}$  на  $L'_{(k)}$  зміни повинні бути внесені тільки у співвідношення, що відносяться до відрізка  $\Gamma_{(k)}$ , тобто, крім самої моделі, прийдеться замінити тільки, можливо, оператори  $\partial L_{(k)}^{(p)}$ ,  $\partial L_{(k)}^{(q)}$ , та  $\varphi_{(k)}^{(p)}$ ,  $\varphi_{(k)}^{(q)}$ .

## Висновки

1. Запропонована фізико-механічна модель взаємодії багатокомпонентних робочих органів бетоноформуючих агрегатів (БФА), яка враховує взаємодію робочого органа а оброблюваної суміші.

2. Застосування загального енергетичного принципу та методів теорії графів дозволяє узгодити енергетичні та силові характеристики БФА на всіх стадіях формування суміші.

3. Впровадження розробленого методу аналізу БФА у практику дозволить отримати максимальну продуктивність операцій за мінімальних енергетичних витрат.

4. Наявність математичної моделі функціонування БФА, заснованої на комбінаторній крайовій задачі на графах, дозволяє здійснювати пошук оптимальних (щодо енерговитрат) режимів функціонування подібних систем та суттєво підвищити якість управління ними.

## Література

1. *Ли В.О.* Зарубежное оборудование для непрерывного формирования железобетонных конструкций // Обзорная информация ЦНИИТЭ Строймаш. – М., 1978. – 70 с.
2. *Гарнець В.М.* Прогресивні бетоноформуючі агрегати і комплекси. – К.: Будівельник, 1991. – 144 с.
3. *Базарбаев Н., Ярошев Д.М.* Энергетика технологических процессов строительного производства. – Ташкент: Фан, 1980. – 120 с.
4. *Гарнець В.М.* Перспективні напрямки розвитку обладнання для безперервного формування залізобетонних конструкцій // Техніка будівництва. – 2002. - №12. – С.35-41.
5. *Сивко В.И.* Основы механики вибрируемой бетонной смеси. – К.: Вища школа, 1987. – 168 с.
6. *Воеводин А.Ф., Шугрин С.М.* Численные методы расчета одномерных систем. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1981. – 208 с.
7. *Яковенко В.Б.* Моделирование и расчет вибрационных систем. – К.: УМК ВО, 1988. – 232 с.

Рецензент: Л.Є. Пелевін, к.т.н., проф.  
(КНУБА, Київ)

Отримано: 12.12.2010 р.