

РЕЖИМНО-ПАРАМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ РОБОТИ МЕХАНІЗМІВ БЕТОНОФОРМУЮЧИХ АГРЕГАТІВ

Для бетоноформуєчих агрегатів безперервної дії розглядаються питання, пов'язані із підвищенням технологічної, експлуатаційної та енергетичної ефективності за рахунок узгодження режимів роботи окремих механізмів із формоутворюючим процесом у цілому. Це дозволяє по-іншому підійти до створення методики розрахунку параметрів робочих органів БФА та режимів їх роботи.

Ключові слова: формоутворення, бетонна суміш, витікання, корпускулярно-хвильова модель.

Для бетоноформовочных агрегатов непрерывного действия рассматриваются вопросы, связанные с повышением технологической, эксплуатационной и энергетической эффективности за счет согласования режимов работы отдельных механизмов из формообразующим процессом в целом. Это позволяет по-другому подойти к созданию методики расчета параметров рабочих органов БФА и режимов их работы.

Ключевые слова: формобразование, бетонная смесь, вытекание, корпускулярно-волновая модель.

For the concrete forming aggregates of continuous action questions connected with increase of technological, operating and power efficiency at the expense of the coordination the modes of operations of separate mechanisms from form-building process as a whole are considered. It allows to approach in another way to creation a design procedure of parameters of workings bodies of CFA and modes of their work.

Key words: form-building, concrete mix, outflowing, wave-corpuscle model.

Постановка проблеми. Створення досконалого технологічного обладнання для виробництва високоякісних залізобетонних конструкцій дозволяє підвищити виробничу і соціальну привабливість будівельної індустрії в цілому. На сучасних підприємствах залізобетонних виробів найбільш високотехнологічним обладнанням для плоских та пустотних панелей є бетоноформуєчі агрегати (БФА) безперервної дії. Незважаючи на широке застосування бетоноформуєчих агрегатів у високорозвинених країнах світу [1, 2], в Україні розроблення таких машин не проводиться.

Однією із причин цього є відсутність рекомендацій щодо їх проектування та методик розрахунку режимів роботи механізмів робочих органів та агрегатів у цілому.

Аналіз останніх досліджень та актуальність теми. В основі ефективності роботи БФА лежить узгоджена дія окремих механізмів робочих органів, що забезпечують операції послідовної обробки бетонної суміші при формуванні виробу [1, 2, 3]. Робочий орган БФА, як правило, складається із механізмів, що забезпечують подачу бетонної суміші до форми, розподілення її, формоутворення й ущільнення виробу та опрацювання його поверхні [2]. Оскільки процес виготовлення виробів пов'язаний із використанням вібраційного впливу на бетонну суміш при одночасному переміщенні агрегата в цілому, актуальною є проблема вивчення динаміки системи “механізми робочого органу – бетонна суміш” у взаємозв'язку цих операцій. Дослідженням динаміки вібраційних систем різної структури, у тому числі і машин поверхневої дії, до яких належать БФА, присвячена низка робіт (Руденко І.Ф. [4], Файвусович О.С. [5], Савінов О.А. [6], Назаренко І.І. [8], Гарнець В.М. [2]), завдяки яким теорія і практика віброформування в цілому отримала значний розвиток.

Формулювання цілей статті. У роботі розглядаються питання, пов'язані з підвищенням технологічної, експлуатаційної та енергетичної ефективності БФА за рахунок узгодження режимів роботи окремих механізмів із формоутворюючим процесом у цілому.

Виклад основного матеріалу. На наш погляд, умови роботи вібраційних БФА поверхневої дії можливо суттєво покращити за рахунок створення раціональної конструкції механізму віброущільнення з одночасною передачею вібраційного впливу на суміш, що знаходиться у бункері та у формі при використанні частини енергії віброзбуджувача для поступального руху агрегата. Відомо, що ефект самопересування широко використовується у віброплитах невеликих розмірів багатьох фірм, наприклад: VIBROMAX (ФРН), ENARCO (Іспанія), DYNASPAN (Швеція) та ін. Досягається ефект самопересування за рахунок кутового розташування, по відношенню до поверхні виробу, віброзбудника таким чином, що вектор збуджуючої сили розкладається на вертикальну і горизонтальну складові і сприяє ущільненню з одночасним пересуванням віброплити. У деяких конструкціях БФА (наприклад, у машинах НДІЗБ, ВНДІЗалізобетон, КНУБА та ін.) також використано кутове розташування віброзбудника для інтенсифікації процесу витікання суміші із бункера БФА. Але аналіз досліджень у цьому напрямку показав, що такі конструктивні рішення не вивчались комплексно з урахуванням усіх діючих сил і можливості впливу віброзбуджувача робочого органу одночасно на процес витікання суміші, ущільнення її та сприяння пересуванню агрегата в цілому. Не проводилась кількісна оцінка витрат енергії на складові операції процесу формування, що не дає можливості

при проектуванні агрегатів диференційовано підходити до визначення параметрів окремих механізмів робочого органу.

Принципова розрахункова схема робочого органу БФА, у якій об'єднано бункерний та віброущільнюючий механізми в єдину конструкцію, показана на рис. 1 із позначенням усіх діючих сил і сил реакцій. Точка О – початок координат – є центром мас системи, до якого прикладена змушуюча сила $F_{зм}$ віброзбудника. Горизонтальна складова змушуючої сили $F_{зм.г}$ сприяє створенню горизонтальних коливань стінок бункера та надає додаткової енергії пересуванню БФА в цілому, оскільки за напрямком збігається з вектором тягового зусилля F_m двигуна механізму пересування БФА.

Аналіз розрахункової схеми й усіх діючих в системі сил показує, що процесові витікання й ущільнення суміші сприяють горизонтальні і вертикальні складові. У той же час для сприяння пересуванню БФА є сума горизонтальних складових

$$F_{зм} \sin \varphi + F_m \geq F_{зс} + F_{mp}^{ш} + F_{mp}^{\delta} \sin \beta + F_{mp.1}^{\kappa} + F_{mp.2}^{\kappa}. \quad (1)$$

Сума рушійних сил у лівій частині, тобто $F_{зм} \sin \varphi$, та тягового зусилля даного рівняння полягає в тому, що горизонтальна складова $F_{зм}$ та тягового зусилля F_m повинні бути більші за величиною, ніж сумарні сили опору агрегата в цілому. Разом із тим, необхідно враховувати, що складові $F_{зм}$ пов'язані між собою таким чином, що вертикальна складова визначається, виходячи із умов віброущільнення шару суміші у формі.

Таким чином, розглядаючи складові діючих сил, які прикладені до різних елементів робочого органу, взаємодіють із бетонною сумішшю на різних етапах її оброблення та забезпечують протікання суттєво різних процесів: витікання бетонної суміші із бункера при її частковому ущільненні; формоутворення виробу у формі при завершальному його ущільненні. Виходячи з цього, на наш погляд, слід розглядати ці процеси як окремі із наступним режимно-параметричним їх узгодженням.

Головною ознакою, за якою слід визначати величини швидкостей витікання суміші та формування, є досягнення на кожному етапі необхідних механічних властивостей. Так, на першому етапі у бункері бажано отримати мінімальну в'язкість суміші для ефективного її витікання. При цьому щільність суміші змінюється від ρ_o до ρ_1 (рис. 1). Після укладання шару суміші у форму в процесі завершального формування щільність досягає максимально можливого значення – ρ_{κ} . Процес реалізується за один прохід. Виходячи із цього, слід визначати величини швидкостей та необхідної питомої роботи ущільнення.

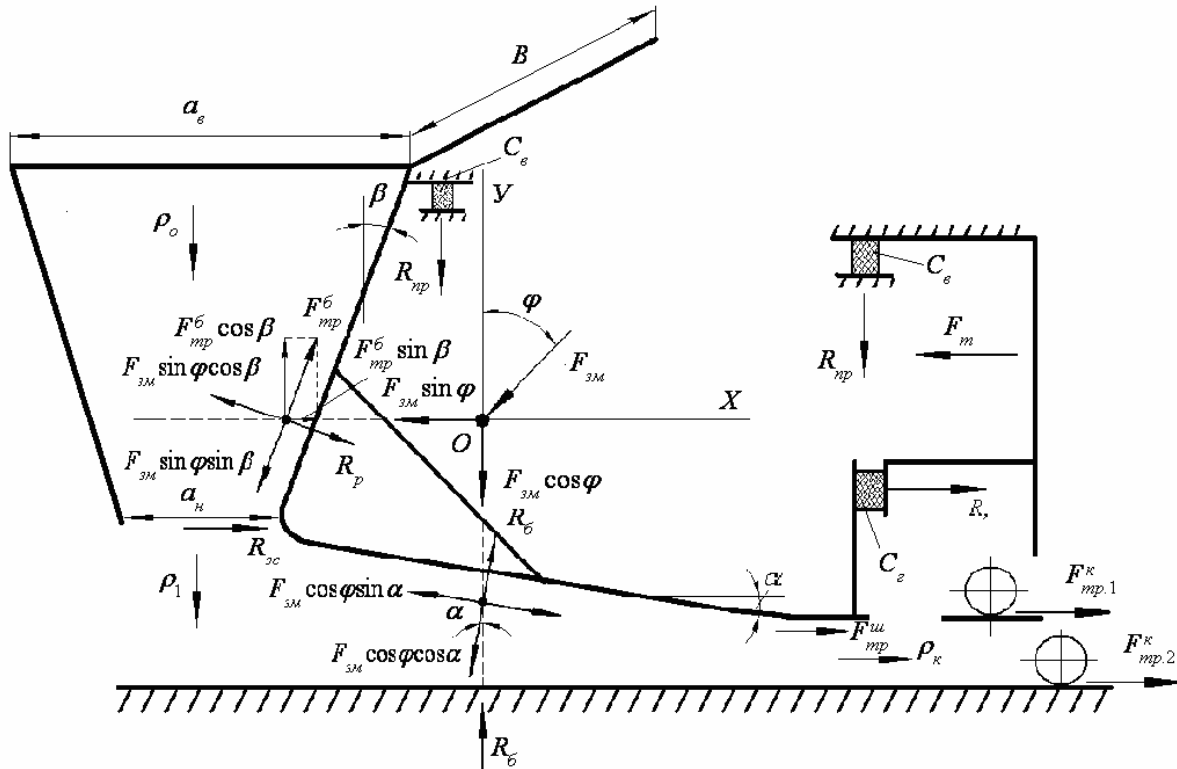


Рисунок 1 – Принципова розрахункова схема робочого органу БФА

На схемі прийняті такі позначення:

- Діючі сили: F_{3M} – змушуюча сила віброзбудника; F_m – тягове зусилля приводу руху БФА; $F_{3M} \sin \varphi$, $F_{3M} \cos \varphi$ – відповідно горизонтальна та вертикальна складові змушуючої сили; $F_{3M} \cos \varphi \cos \alpha$ – складова вертикальної сили $F_{3M} \cos \varphi$, що діє на шар суміші у формі під профільним кутом α ковзної вібролижі; $F_{3M} \cos \varphi \sin \alpha$ – складова $F_{3M} \cos \varphi$, що діє у пограничному шарі “ковзний штамп – шар суміші у формі”; $F_{3M} \sin \varphi \cos \beta$ – складова $F_{3M} \sin \varphi$, яка діє на шар бетонної суміші у бункері; $F_{3M} \sin \varphi \sin \beta$ – складова $F_{3M} \sin \varphi$, яка діє у пограничному шарі між бетонною сумішшю і стінкою бункера.
- Сили реакції бетонної суміші: R_{zc} – сила опору зсуву бетонної суміші; R_p – розпірні сили на стінки бункера; R_b – реакція шару суміші; R_d – реакція дна форми; $R_{np.1}$, $R_{np.2}$ – реакції пружних опор відповідно у горизонтальному та вертикальному напрямі, які виникають при коливаннях та під дією F_m .
- Сили тертя: F_{mp}^b – сила тертя шарів бетонної суміші зі стінками бункера; $F_{mp}^b \sin \beta$, $F_{mp}^b \cos \beta$ – відповідно горизонтальна і вертикальна складова сили F_{mp}^b ; F_{mp}^u – сила тертя між ковзним штампом і шаром суміші у формі; $F_{mp.1}$, $F_{mp.2}$ – сили тертя кочення коліс робочого органу і БФА при їх поступальному русі.

Об’єм суміші, на який впливають одночасно віброючі поверхні бункера і ковзного віброштампа:

$$V = V_{\bar{o}} + V_{\bar{\phi}}, \quad (2)$$

де $V_{\bar{o}}$, $V_{\bar{\phi}}$ – відповідно об'єми сумішей, які обробляються за одиницю часу в бункері й у формі. Згідно з розрахунковою схемою загальний об'єм

$$V_{\bar{o}} = \frac{a_{\bar{o}}}{a_n} B \cdot v_{\bar{o}} + B h_{\bar{o}} v_{\bar{\phi}} = B \left[\frac{(a_{\bar{o}} + a_n)}{2} v_{\bar{o}} + h_{\bar{o}} v_{\bar{\phi}} \right], \quad (3)$$

де $v_{\bar{o}}, v_{\bar{\phi}}$ – відповідно швидкості витікання і формування суміші; $a_{\bar{o}}, a_n$ – верхня та нижня ширина бункера.

Питомі роботи ущільнення залежно від стадії процесу (витікання чи завершувальне формування) суттєво відрізняються. На базі низки досліджень [7, 8, 9] для процесу витікання $A_{\bar{o}} \approx (100 \div 150) \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$; для процесу формоутворення виробів із напівжорстких сумішей $A_{\bar{\phi}} \approx (300 \div 550) \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$.

Якщо вважати коливання елементів бункера і плити віброштампу гармонійними та опір деформуванню пропорційними швидкості, то середня потужність, необхідна для ущільнення суміші, запишеться у вигляді

$$P_{cp} = \frac{\omega^2}{2} (a_1^2 \cdot c_{01} \cdot S_{cm}^{\bar{o}} + a_2^2 \cdot c_{02} \cdot S_{um}), \quad (4)$$

де $a_1^2, c_{01}, a_2^2, c_{02}$ – відповідно амплітуда коливань та питомий опір коливань для стінки бункера площею $S_{cm}^{\bar{o}}$ та плити віброштампу площею S_{um} .

Оскільки потужність ущільнення пов'язана з питомою роботою, то розподіляючи її для бункера і штампу, отримаємо

$$P_1 = \left(\frac{a_{\bar{o}} + a_n}{2} \right) \cdot B \cdot v_{\bar{o}} \cdot A_{\bar{o}}; \quad (5)$$

$$P_2 = B h_{\bar{o}} \cdot v_{\bar{\phi}} \cdot A_{\bar{\phi}}. \quad (6)$$

Знайдена $v_{\bar{o}} = \frac{P_1}{\left(\frac{a_{\bar{o}} + a_n}{2} \right) \cdot B \cdot A_{\bar{o}}}$ із (5) може враховуватись як така, що

забезпечується при заданій геометрії бункера і потужності коливань. Для реалізації взаємозв'язку між режимами дії бункера і штампу необхідно дотримуватись закону постійності потоку маси. Це означає, що маса суміші щільністю ρ_1 , яка витікає через вихідний отвір бункера площею $S_{\bar{o}}$ за одиницю часу із швидкістю $v_{\bar{o}}$, повинна дорівнювати масі суміші щільністю ρ_k , яка виходить після ущільнення ковзним віброштампом зі

швидкістю v_ϕ . Насправді ж це є потік відформованого виробу площею $S_{вир}$, тобто

$$\rho_1 \cdot v_\phi \cdot S_\delta = \rho_k \cdot v_\phi \cdot S_{вир} \quad (7)$$

Для з'ясування фізичної особливості процесу витікання розглянуто умови його проходження [3]. Витікання бетонної суміші реалізується в результаті гравітаційного розвантаження під впливом вібраційного збудження. Необхідність використання вібраційного впливу для інтенсифікації процесу витікання суміші обумовлюється її специфічними фізико-механічними властивостями: високою вологістю, великими значеннями коефіцієнтів внутрішнього і зовнішнього тертя, схильністю до налипання та утворення склепінь. Вібраційна обробка, послаблюючи структурні зв'язки і знижуючи в'язкість, сприяє витіканню суміші. При цьому гіпотетично припускається, що величина діючого ефективного прискорення q_{ef} відрізняється від прискорення земного тяжіння g . Для визначення v_ϕ в роботі [3] розглянута задача поведінки суміші під дією коливань.

У результаті дії збуджуючої сили вібратора в масиві суміші розповсюджуються хвилі напруг, які визначаються геометрією бункера та розташуванням збуджувача. У випадку плоскої хвилі напрямок їх поширення представляється вертикальною та горизонтальними складовими. Використовуючи підхід “взаємодії найближчих сусідів”, запропонований у роботі [11], запишемо рівняння сил, що діють на елементарну частинку суміші масою m у полі плоскої хвилі, у такому вигляді:

$$m(g + A^* \omega^2 \sin \omega t) = h_{ef} \left(\frac{\partial j}{\partial t} \right) + \sigma f_{ef}, \quad (8)$$

де $A^* = A_0 \cdot \cos \delta$ – плинне значення амплітуди коливань на відстані r за напрямком \vec{N} ; α – коефіцієнт затухання; ω – частота; t – час; h_{ef} – ефективна в'язкість за моделлю Бінгама – Шведова; σ – напруга; $\frac{\partial j}{\partial t}$ – швидкість деформації; f_{ef} – ефективний коефіцієнт тертя.

У результаті розв'язання цього рівняння отримано вираз для визначення швидкості квазіламінарного витікання суміші, представленій корпускулярно-хвильовою моделлю

$$v_\phi = \sqrt{\frac{q_{ef} R_z}{2tg(90 - \delta)}} \cdot th \left[\sqrt{\frac{2tg(90 - \delta)}{r_z}} \cdot t \right], \quad (9)$$

де q_{ef} – ефективне прискорення частинки в масиві суміші під дією вібрації; R_2 – гідравлічний радіус вихідного отвору; δ – кут поляризації коливань по вертикалі.

Для досягнення кінцевої щільності ρ_k необхідно забезпечити певну довготривалість вібраційного оброблення ковзним віброштампом. При цьому профіль штамбу та режими коливань повинні визначатись залежно від властивостей суміші та висоти виробу.

Виходячи з (7) і (9), для швидкості формування можливо записати

$$v_\phi = \frac{\rho_o}{\rho_k} \cdot \frac{S_\delta}{S_{sup}} \sqrt{\frac{q_{ef} R_2}{2tg(90 - \delta)}} \cdot th \left(\sqrt{\frac{2tg(90 - \delta) q_{ef}}{R_2}} \right). \quad (10)$$

Таким чином, при заданому коефіцієнтові ущільнення, швидкість формування знаходиться відповідно до v_ϕ при певному співвідношенні площ вихідного отвору бункера і площ поперечного перерізу виробу.

Висновки та перспективи подальших досліджень:

1. Проведено комплексний аналіз роботи механізмів БФА та встановлено їх функціональний взаємозв'язок.
2. Сформульовано шляхи аналітичного вирішення задачі формування залізобетонних конструкцій за допомогою вібропротяжних механізмів.
3. Отримано розв'язання задачі витікання бетонної суміші, яка представлена корпускулярно-хвильовою моделлю.

Узгодження між собою основних показників процесу в майбутньому дозволяє розробити методику розрахунку параметрів робочих органів БФА та режимів їх роботи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ли В.А. Обзорная информация. Зарубежное оборудование для непрерывного формования железобетонных конструкций / В.А. Ли. – М., 1978. – 55с.
2. Гарнець В.М. Прогресивні бетоноформуючі агрегати і комплекси / В.М. Гарнець – К.: Будівельник, 1991. – 145с.
3. Гарнець В.М. Визначення продуктивності процесів при формуванні на БФА / В.М. Гарнець, О.О. Булавка // Техніка будівництва. – 2007. – №20. – С. 74 – 76.
4. Руденко И.Ф. Формование изделий поверхностными виброустройствами / И.Ф. Руденко – М., 1972. – 104с.
5. Файвусович А.С. Об оптимальных режимах виброуплотнения и виброформования мелкозернитых бетонных смесей при поверхностном формовании / А.С. Файвусович, И.Ф. Руденко // Теория формования бетона: сб. тр. ОНТИ НИИЖБ. – М., 1969. – С. 110 – 118.

6. Савинов О.А. Теория и методы вибрационного формования железобетонных изделий / О.А. Савинов , Е.В. Лавринович – Л.: Стройиздат, 1972. — 152 с.
7. Зубанов М.П. Вибрационные машины для уплотнения бетонных смесей и грунта / М.П. Зубанов – М.: Машиностроение, 1964. – 198 с.
8. Назаренко И.И. Высокоэффективные виброформовочные машины / И.И. Назаренко – К.: Высшая школа, 1988.
9. Гарнець В.М. Дослідження процесу витікання бетонної суміші, представленої корпускулярно – хвильовою моделлю / В.М. Гарнець. // Збірник ГБДММ. – 2001. №67 – С. 34–36.
10. Гячев Л.В. Движение сыпучих материалов в трубах и бункерах / Л.В. Гячев – М.: Машиностроение, 1968. – 184 с.
11. Гиришель Г.Б. О физической природе вибрационного воздействия на уплотнения смеси / Г.Б. Гиришель // Технология бетона и железобетонных конструкций: сб. тр. НИИСК Госстроя УССР. – К.: Будівельник, 1972. – С. 142–148.