

В.М. Гарнець, к.т.н., проф. (КНУБА, Київ);  
С.В. Зайченко, к.т.н., доцент (НТУУ «КПІ», Київ);  
Я.С. Приходько; В.О. Шаленко (КНУБА, Київ)

## РОЗРОБКА НАУКОВО-ПРАКТИЧНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ ПО СТВОРЕННЮ БЕТОНОФОРМУЮЧИХ АГРЕГАТІВ (БФА).

*АНОТАЦІЯ.* В статті розглядаються науково – практичні проблеми, які вирішуються колективом кафедри «Основ професійного навчання» факультету АІТ КНУБА у тематичному напрямку, пов'язані із подальшим удосконаленням конструктивних рішень та інженерних розрахункових методик для створення сучасної бетоноформуючої техніки.

*Ключові слова:* залізобетон, вібрація, формування, ущільнення, середовище, амплітуда.

*АННОТАЦИЯ.* В статье рассматриваются научно – практические проблемы, которые решаются коллективом кафедры «Основ профессионального обучения» факультета АИТ КНУСА в тематическом направлении, связаны с последующим усовершенствованием конструктивных решений и инженерных расчётных методик для создания современной бетоноформирующей техники.

*Ключевые слова:* железобетон, вибрация, формирование, уплотнение, среда, амплитуда.

*SUMMARY.* In the article examined scientifically – practical problems which decide the collective of department of «Bases of professional studies» of faculty of АIT КNUBA in thematic direction are related to the subsequent improvement of structural decisions and engineerings calculation methods for creation of modern бетоноformuyuchei technique.

*Key words:* reinforced concrete, vibrciya, forming, compression, environment, amplitude.

---

### Вступ

Дослідження техніко-економічного стану будівельної індустрії в розвинутих країнах світу дає можливість зробити висновок, що основним будівельним матеріалом у ХХІ столітті залишиться залізобетон, загальна кількість виробництва якого в світі перевищує 2млр. м<sup>3</sup> на рік. Значною часткою цієї кількості являється збірний залізобетон.

Сучасні будівельні технології розвиваються в напрямку використання комбінованих систем, в яких поряд з монолітними широко використовуються збірні залізобетонні конструкції [1,2,3]. Також розробляється концепція можливості повторного використання збірних залізобетонних елементів шляхом розбирання будівель і споруд при виведенні їх із експлуатації. Для цього вже на сьогоднішній день зводяться споруди із збірного залізобетону, у яких конструкція з'єднання елементів передбачає в подальшому можливість їх розбирання і демонтажу.

Таким чином, практично не викликає сумніву напрямок розвитку будівельної індустрії, при якому збірний залізобетон збереже за собою домінуюче положення, пе-

ред усім при масовому будівництві промислових і цивільних споруд, для виготовлення спеціалізованих виробів (мостових конструкцій, труб, шпал, елементів колодязів, паль і т. ін.).

### Мета і завдання дослідження

Відповідно до такого стану розвитку будівельної індустрії напрям роботи кафедри ОПН відповідає прогресивним тенденціям розвитку машинобудування для виробництва збірного залізобетону.

Відомо, що технологічні процеси вібраційного або безвібраційного формування залізобетонних виробів включають такі основні операції:

- підготовка та змащування форм або стендів;
- встановлення арматурних та закладних елементів;
- для пустотних виробів – установка пустотоутворювачів;
- укладання бетонної суміші у форму та її розподіл відповідно із формою виробу;
- ущільнення суміші та формоутворення виробу; опорядження поверхні.

Укладання, розподіл, ущільнення бетонної суміші та опорядження поверхні щойно відформованого виробу виконує обладнання, що має загальну назву – бетоноформуєче.

Аналіз існуючої технічної і економічної інформації, досвід промислових і лабораторних досліджень дозволяє стверджувати, що створення нових БФА і розробка методики їх проектування і розрахунку є актуальними на сьогодні і перспективними на майбутнє.

### Виклад основного матеріалу

В роботах кафедри удосконалювались розробки, пов'язані із вібраційними, безвібраційними і комбінованими методами формування. Відомо, що в подібних складних багатоопераційних системах задача моделювання не може зводитись до однієї з операцій, оскільки характер взаємодії і стан середовища під час виконання різних операцій суттєво різні. Для визначення реальної взаємодії на різних етапах їх слід розглядати окремо, забезпечуючи їхню стиковку („шивання”) за показниками продуктивності при збереженні вимог якості продукції та енергетичної доцільності процесу. Тобто, для стійкої роботи агрегату необхідно витримувати баланс продуктивностей окремих механізмів, що визначає і продуктивність агрегату в цілому, тобто:

$$P_1 \equiv P_2 \equiv P_3 \equiv \dots \equiv P_{БФА}, \quad (1)$$

де:  $P_1, P_2, P_3, \dots$  – продуктивності окремих механізмів;  $P_{БФА}$  – продуктивність агрегату.

У зв'язку з цим моделювання проводиться на базі загального енергетичного принципу, суть якого полягає в отриманні максимальної продуктивності кожної з операцій при мінімізації енергетичних витрат. Реалізація принципу здійснюється шляхом введення в умови рівності необхідної і виконаної роботи енергопоглинаючих властивостей суміші відповідно до етапу обробки. Для кожної операції повинно виконуватись оптимальне рівняння необхідної і виконаної робіт:

$$\int_0^m \left( W_i \frac{m_i}{V} \right) dm = \int_0^t k_i P_i dt_i, \quad (2)$$

де  $W_i$  – енергопоглинаючі властивості середовища при виконанні  $i$ -ої операції;  $m_i$  і  $V_i$  – відповідно, маса і об'єм суміші в зоні обробки;  $k_i$  – коефіцієнт корисної дії  $i$ -го механізму під час передачі енергії від механізму до суміші;  $t_i$  – час виконання  $i$ -ої операції;  $P_i$  – необхідна потужність  $i$ -го робочого органа;

За мірою проходження різних етапів обробки величина енергопоглинання знижується за рахунок переходу кількості накопичених сумішшю деформацій в її новий якісний стан:

$$\left( W_i \frac{m_i}{V_i} \right) dm = m_i dW. \quad (3)$$

Умови (2) і (3) по суті показують нерозривний зв'язок між величинами, які характеризують параметри машини, властивості суміші і режим протікання процесу, які є аналітичною моделлю передачі енергії від джерела до оброблюваного середовища. Для основних операцій процесу формування отримані аналітичні залежності, які дозволяють визначити необхідні витрати енергії.

Так, для бетоноформуєчих агрегатів, обладнаних поверхневими ковзними віброштампами вирішувались задачі витікання бетонної суміші у форму, укладання її, визначення режимів коливання віброзбудника та тягового зусилля для вибору потужності двигуна.

В роботах по вивченню процесів завантаження суміші у форму та її рівномірного розподілу отримані аналітичні залежності для розрахунку швидкості квазіламінарного витікання суміші, представлені корпускулярно - хвильовою моделлю:

$$v_e = \sqrt{\frac{q_{ef} \cdot R_z}{2tg(90^\circ - \delta)}} \cdot th \left( \sqrt{\frac{2tg(90^\circ - \delta) q_{ef}}{R_z}} \cdot t \right), \quad (4)$$

де:  $R_z$  – гідравлічний радіус вихідного отвору;  $q_{ef}$  – ефективне прискорення частинки в масиві суміші під дією вібрації;  $\delta$  – кут поляризації коливань по вертикалі;  $t$  – час.

Це дозволило визначити час звільнення ємкості бункеру від суміші, питомі витра-

ти суміші за одиницю часу, розраховувати можливі діапазони зміни швидкості формування, тобто руху бетоноформуєчого агрегату і, таким чином, з урахуванням енергетичних витрат на віброущільнення суміші, визначити встановлену потужність агрегату в цілому.

За процес досліджень динамічної поведінки поверхневого ковзного вібратора встановлено, що амплітуда коливань не залишається постійною за зміною умов формування. Вона залежить від висоти стовпа бетонної суміші і властивостей суміші, які виражаються хвилювими коефіцієнтами  $a$  і  $b$ , які характеризують динамічні параметри бетонної суміші. Амплітуда визначається також конструкцією робочого органа, характерні параметри (маса і жорсткість) якого виражаються через  $|C - M\omega^2|$ . Отримано вираз, який дозволяє розраховувати амплітуду коливань робочого органа масою  $M$  двохмасного вібратора:

$$A_1 = A_0 \eta \frac{\sqrt{(a^2 + b^2)d}}{\sqrt{\left[ a + \frac{m\omega^2}{|C - M\omega^2|} \right]^2 + b^2}}, \quad (5)$$

де  $A_0 = \frac{m_0 r_0}{M}$  – амплітуда коливань маси  $M$  в повітрі;  $\eta$  – коефіцієнт динамічності робочого органа.

Таким чином, отримана аналітична залежність дозволяє прогнозувати закономірності руху робочого органа БФА за різних умов формування бетонних виробів.

Для визначення величини тягового зусилля на переміщення робочого органа вздовж формуєчого виробу треба врахувати усі значущі сили, що діють у горизонтальній площині (рис.1):

$$F_m = fG \left( \frac{f_{mpk} + \mu d}{D} \right) \zeta + [F_{3m} + (m_{b,\delta} \sin \beta + m_{b,ai} \sin \xi)g]f + ka_a h \cos \nu - F_{3m} \sin \varphi, \quad (6)$$

де:  $\varphi$  – поточний кут нахилу вібробудувача;  $F_{3m}$  – змушуюча сила;  $F_m$  – сила тяги приводу двигуна;  $F_{3c}$  – сила опору зсуву бетонної суміші з бункера;  $F_{mp}$  –

сила тертя бетонної суміші зі сталлю;  $S$  – площа днища форми;  $G$  – сила ваги вібраційної машини;  $\mu$  – коефіцієнт прилипання;  $f$  – коефіцієнт тертя;  $F_{3m} \sin \varphi$ ,  $F_{3m} \cos \varphi$  – відповідно, горизонтальна та вертикальна складові змушуючої сили;  $F_{mp}^{\delta}$  – сила тертя шарів бетонної суміші із стінками бункера;  $F_{mp}^{\delta} \sin \beta$ ,  $F_{mp}^{\delta} \cos \beta$  – відповідно, горизонтальна і вертикальна складова сили  $F_{mp}^{\delta}$ ;  $F_{mp}^{uu}$  – сила тертя між ковзним штампом і шаром суміші у формі;  $F_{mp,1}$ ,  $F_{mp,2}$  – сили тертя кочення коліс робочого органа БФА під час їх поступального руху.

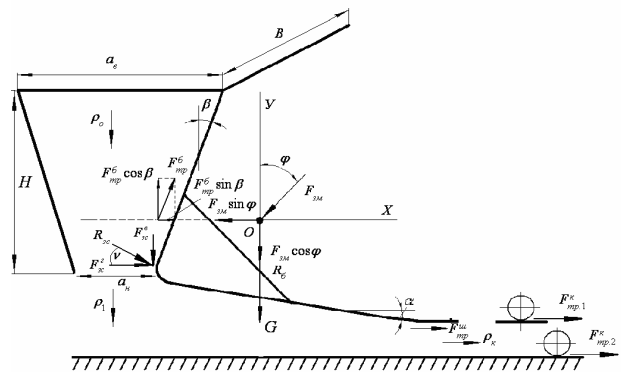


Рис. 1. Розрахункова схема робочого органа БФА поверхневої дії

Знаючи величину тягового зусилля вібраційної машини, яке необхідне при формуванні бетонної суміші та швидкість формування, можливо визначити потужність на переміщення БФА в цілому.

В дослідженнях робочих процесів системи «віброплощадка - бетонна суміш - привантажувач» з урахуванням зміни і впливу дотичних напружень на ефективність ущільнення бетонних сумішей, розроблені рекомендації щодо визначення робочих параметрів та конструювання ущільнюючих машин, визначені методи режимної стабілізації системи, запропоновано методіку розрахунку динамічних систем подібного типу і нові конструкторсько - технологічні рішення установок з привантажувачами ефективною дією.

При вивченні технічних систем для виробництва трубчастих залізобетонних ви-

робів встановлено, що найбільш ефективним напрямом в такому разі є використання форми як робочого органа, а збудники коливань повинні бути розташованими вертикально із зсувом фаз поміж собою. Для досліджуваної системи обґрунтовано і вибрано фізичну і математичну моделі, визначені закономірності руху таких машин за умов взаємодії із бетонною сумішшю з урахуванням зсуву фаз поміж положеннями дебалансів. Визначені раціональні параметри коливань, запропоновані принципи створення нових високоефективних віброустановок, розроблено алгоритм і методику інженерного розрахунку основних параметрів робочого процесу. Результати роботи знайшли свої втілення у виробництві і учбовий процес.

В Київському національному університеті будівництва і архітектури також проводяться роботи по створенню безвібраційних БФА на основі роликів формувальних агрегатів, які дозволяють ущільнювати наджорсткі суміші. Був проведений попередній промисловий експеримент, на протязі 1985-2000р.р., була успішно проведена робота по вивченню можливостей використання цього метода для виробництва пустотних панелей, отримано більше 28 авторських свідоцтв і деклараційних патентів.

Аналіз існуючих вібраційних і безвібраційних технологій і обладнання для ущільнення бетонних (в тому числі наджорстких) сумішей, створених на базі досліджень багатьох вчених і конструкторів, дозволив зробити висновок про те, що розробка і втілення способу безперервного формування пустотних плит дасть значний ефект за рахунок підвищення якості випускаємої продукції, повної автоматизації процесу формування, зниження металоємкості обладнання і поліпшення зручності робочих місць на підприємствах по виробництву залізобетонних конструкцій.

Переваги безперервного формування пустотних плит більш ефективно виявляються при використанні безвібраційного роликів формувальних агрегатів, який підвищує ступінь ущільнення, особливо для наджорстких сумішей, і надає можли-

вість повної автоматизації процесу. Тому робота була присвячена дослідженню взаємодії робочих органів роликів машин з бетонними наджорсткими сумішами та створенню за цією основою роликів формувальних агрегатів для виробництва пустотних панелей.

Для теоретичного дослідження закономірностей процесу роликів формувальних агрегатів розглянуто найбільш реально можливі схеми взаємодії, новизна яких підтверджена патентами і які пройшли попереднє виробничо-лабораторне випробування. Це схема ущільнення за допомогою роликів формувальних агрегатів частини якого виконана з радіальними виступами (рис.2,а) і схема з комбінованим робочим органом у вигляді тороїдально-циліндричного і циліндричного роликів (рис.2,б). Принципово робочі органи роликів формувальних агрегатів уявляють собою систему роликів (в комбінації з бункерним механізмом), які жорстко зафіксовані за висотою і забезпечують ущільнення за рахунок вдавлювання порцій суміші за їх вимушеним перекошуванням. При формуванні за схемою (рис.2,а) ущільнення відбувається в один шар суміші при розташуванні осей роликів повздовж осі виробу. При формуванні за схемою (рис.2,б) ущільнення відбувається у два шари. Нижній шар формується тороїдально-циліндричним роликом, вісь якого розташована перпендикулярно до осі виробу. Відформований шар становить нижню половину виробу. Верхній шар формується циліндричним роликом 3, або комбінованими, як у схемі на рис.2,а. Тороїдально-циліндричний ролик (п.1 і 2 на рис.2,б) здійснює зворотно-поступовий рух у повздовжньому напрямку, а циліндричний – у поперечному. Під час формування весь агрегат разом з пустототворювачами 4 рухається в напрямку порожньої частини форми, залишаючи за собою відформовану стрічку виробу постійного перерізу. При визначенні теоретичних закономірностей процесу ущільнення комбінованим роликом (рис.2,а), а

саме – секцією з радіальними виступами, використано метод кінцевих елементів.

Суміш при роликовому ущільненні поводить себе як пластичне тіло і на початкових етапах проявляє незначні пружні властивості. Разом з тим, з теорії пластичності відомо, що в таких випадках задовільні результати дає використання жорстко-пластичної моделі суміші. Тому, для дослідження процесу роликового формування запропоновано жорстко-пластичну модель суміші. Головною характеристикою пластичної деформації є граничний опір зсуву  $\tau_s$ .

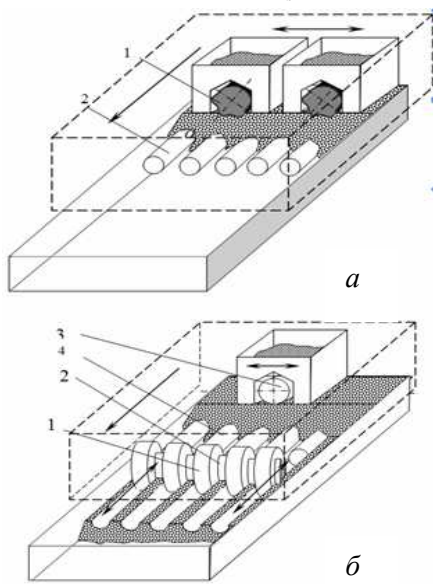


Рис.2. Схеми роликового формування пустотної плити

Умови рівноваги стовпчика суміші, в такому разі, описуються диференційними рівняннями, рішення яких дозволяють визначити контактні тиски в зоні взаємодії робочих органів з середовищем, а рівняння рівноваги у загальному випадку має наступний вигляд:

$$(\sigma_x + d\sigma_x)(h_x + dh_{nx}) - \sigma_x h_x - p_x \operatorname{tg} \varphi_x dx + \mu p_x dx + \mu p'_x dx = 0, \quad (7)$$

де:  $p_x, \tau_x$  – нормальна і дотична складові реакції тиску взаємодії ролика зі стовпчиком бетонної суміші шириною  $dx$ ;  $\sigma_x$  – середнє значення за висотою нормального тиску бетонної суміші;  $\mu$  – коефіцієнт тертя бетонної суміші об робочі органи бето-

ноформуючого агрегату;  $\varphi_x$  – кут захвату відповідний точці на ободі ролика;  $h_i$  – відстань від дна форми до дотичної в нижній точці ролика;  $h_x$  – відстань від дна форми.

Використовуючи метод кінцевих елементів були знайдені зусилля в контактних зонах. Це дозволило знайти повний опір на перекочування ролика з радіальними виступами. Для умов експериментальної установки при  $R=0.12\text{м}$  і  $R_{max}=0.15\text{м}$  отримано графіки значення сил і моментів залежно від відстані  $\delta$  (рис. 3).

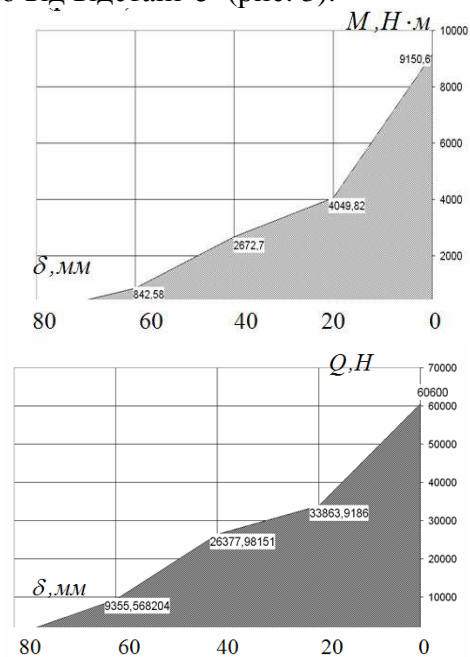


Рис. 3. Графіки зміни  $M(\delta)$  і  $Q(\delta)$

Відповідно до цього в КНУБА були розроблені нові технічні рішення агрегатів, які дозволяють використовувати в комплексі безвібраційні методи ущільнення.

Особливістю безвібраційного роликоекструзійного ущільнення є поєднання двох виконавчих механізмів: роликів різної форми і конфігурації та шнек-екструдерів (рис.4). Під час зворотно-поступального руху формуючих роликів відбувається перерозподіл напружень, активація та ущільнення бетонної суміші за рахунок поступового багаторазового насичення шарів виробу новими порціями суміші (підсипки). Шнеки безперервно подають та підпресовують суміш зсередини. В цьому

разі виникаючі реактивні сили рухають БФА в напрямку, проти- лежному формуванню. За допомогою геометрії форми, стабілізуючої плити та пустотоутворювачів досягаються потрібні конфігурація та розміри виробу.

Створення таких складних агрегатів потребує всебічного теоретичного та експериментального дослідження системи, в якій взаємодіють різні механізми та формоутворюючі елементи із бетонною сумішшю.

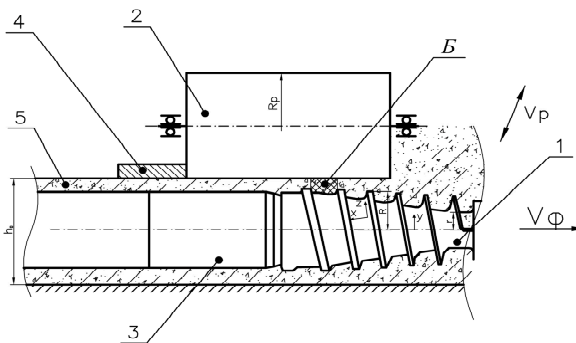


Рис. 4. Схема ролик-екструзійного формування:  
1 – шнек; 2 – ролик; 3 – пустотоутворювач;  
4 – стабілізуюча плита; 5 – виріб

Схема ролик-екструзійного формування наведена на рис.4. Циліндричний жорсткий (або комбінований) ролик 2 виконує зворотньо-поступальні рухи на висоті виробу 5 зі швидкістю  $V_p$ . Шнек-екструдер 1 нагнітає бетонну суміш у порожнину форми. В такому разі попередньо утворюється форма отвору, який в подальшому калібрується пустотоутворювачем 3. Весь агрегат завдяки рушійним силам реакції рухається в протилежному напрямку зі швидкістю формування  $V_\Phi$ . Для усунення випору суміші з-під роликів передбачається стабілізуюча плита 4.

Розглядаючи умови формування в найбільш невідгідних положеннях, тобто коли суміш знаходиться між роликом та серцевиною шнека, сумарне напруження буде дорівнювати:

$$\bar{\sigma}_{zz}(z) = (\sigma_0 + \sigma_p) \exp(kfF_{\alpha,\delta}z) \quad (8)$$

де  $\sigma_0 = pgh$  – початкове напруження, діюче на елемент суміші від сили ваги її

$$\text{стовпа; } \sigma_p = g_x = g_{\max} \left( \frac{R_p h_0 + x^2}{R_p h_0 + x_k^2} \right)^{\beta-1} \exp(\pm\gamma) -$$

нормальні напруги, які створюються завдяки дії ролика при вдавлюванні підсіпки;  $\rho$  – щільність бетонної суміші;  $g$  – сила тяжіння;  $h$  – висота стовпа бетонної суміші в бункері;  $z$  – поточна координата;  $g_{\max}$  – максимальний тиск, що виникає під роликом;  $x$  та  $x_k$  – координати точок;  $\beta$  – коефіцієнт, що залежить від властивостей бетонної суміші і визначається експериментально;  $\gamma$  – показник ступеня, який залежить від точки прикладення сил на дузі контакту та умов взаємодії ролика з бетонною сумішшю.

На рис.5. графічно показано залежність нормальних напружень  $\sigma_{zz}$  від параметрів шнек-екструдера та умов формування.

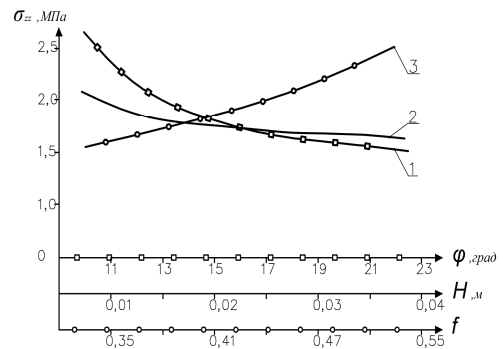


Рис. 5. Графіки залежності нормальних напружень від параметрів шнека:  
1 – від кута нахилу витків  $\phi$ ; 2 – від висоти каналу витків  $H$ ; 3 – від коефіцієнта тертя шнека із середовищем  $f$

Гіпотетично, найбільші напруження виникають у зоні, коли елементарний об'єм знаходиться між роликом і серцевиною шнека.

Рівняння рівноваги сил діючих на елемент в напрямку осі

$$F_{\sigma_1} + F_p \cos \alpha - F_{\sigma_2} - F_b - 2F_0 = 0 \quad (10)$$

де  $F_{\sigma_1}$  та  $F_{\sigma_2}$  – сили, які виникають від дії нормальних напружень  $\sigma_{zz}$ , що діють у поперечному перетині каналу;  $F_p$  – дотична сила дії ролика на матеріал;  $F_b$  та  $F_0$  – си-

ли тертя матеріалу з валом шнека та боковими поверхнями каналу.

Середньоінтегральні значення нормальних напружень за висотою витка запишуться у вигляді:

$$\bar{\sigma}_{zz} = \frac{1}{H} \int_0^H \bar{\sigma}_{zz}(y) dy, \quad \bar{\sigma}_{xx} = \frac{1}{H} \int_0^H \bar{\sigma}_{xx}(y) dy \quad (11)$$

В роботі зроблено аналіз взаємодії робочих органів за ролико-екструзійному формуванні. Побудовано графічні залежності нормальних напруг від параметрів шнек-екструдера та умов формування, які показують, що найбільший вплив на процес формування має кут нахилу витків та коефіцієнт тертя суміші із робочими органами. Для визначення оптимальних параметрів потрібно провести енергетичний розрахунок агрегатів ролико-екструзійного формування та експериментальне дослідження процесу ущільнення.

### Висновки

Результати теоретичних і експериментальних досліджень, які проводились на протязі останніх років на кафедрі знайшли своє практичне втілення при проведенні навчального процесу і на виробництві. Кожний рік за тематикою формуючого обладнання виконуються дипломні проекти спеціалістами ОПН, магістерські роботи по спеціальності БМО, захищено чотири кандидатські дисертації. Формувальні установки з поверхневими ковзними віброштампами і роликові безвібраційні машини були втілені у виробничі процеси на підприємствах України. На майбутнє розробляються пропозиції для підприємств щодо розробки дослідних виробничих зразків нових удосконалених конструктивно-технологічних рішень бетоноформуючих агрегатів.

### Література

1. *Гарнець В.М.* Прогресивні бетоноформуючі агрегати і комплекси.- К.»Будівельник», 1991, с.145.
2. *Звездов А.И., Михайлов К.В.* XXI век-век бетона и железобетона, ж. Бетон и железобетон, №1. 2001,М., с.2-6.
3. *Гарнець В.М.* Перспективні напрямки розвитку обладнання для безперервного формування залізобетонних конст-рукцій // Техніка будівництва.-К.,2002.-№13.-С.35-41.

*Рецензент:* А.В. Фомін, к.т.н., проф.  
(КНУБА, Киев)

*Отримано:* 05.06.2012 р.