

УДК 691:620.18

Ю. С. Бікс, асп.;

Г. С. Ратушняк, канд. техн. наук, проф.;

Н. М. Слободян, канд. техн. наук, доц.

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗМІНИ ВЕЛИЧИНИ БУЛЬБАШКИ ПОВІТРЯ В ПРОЦЕСІ ВИГОТОВЛЕННЯ БЕТОННИХ ВИРОБІВ

*Отримано математичну модель зміни величини бульбашки повітря, що знаходиться в ущільнюваній суміші в процесі виготовлення бетонних виробів, від впливу глибини занурення, сумарної дії величини тиску привантаження та густини суміші. Виявлено, що приріст тиску привантаження величиною  $1 \cdot 10^5$  Па для сумішей з густиною 1900...2500 кг/м<sup>3</sup> несуттєво впливає на зміну величини співвідношення об'єму бульбашки повітря на поверхні суміші до величини об'єму бульбашки на глибині 0,5 м, а саме  $\Delta V \approx 5\%$ .*

### Вступ

Сучасний рівень розвитку бетонознавства суттєво змінює уявлення про властивості бетону як конструкційного матеріалу та про технологічні особливості процесу його ущільнення. Процес ущільнення суміші під час виготовлення бетонних виробів базується на розрахунку основних робочих параметрів технологічних режимів їх функціонування [1—3].

Впровадження енергозбережливих технологій виготовлення бетонних виробів потребує дослідження основних закономірностей зміни параметрів руху системи «вібратор—бетонна суміш—привантаження», якими є потужність; динамічний тиск, за різних технологічних умов, й амплітуда коливань, з урахуванням динамічних характеристик бетонної суміші [1—4]. Оптиміальні розрахункові параметри технології виготовлення бетонних виробів можуть бути отримані з урахуванням фізико-механічної моделі ущільнення суміші, в якій враховані її інерційні, пружні та дисипативні характеристики.

### Постановка задачі та визначальні співвідношення

Фізичну природу сил пружного опору суміші в технологічному процесі її ущільнення під час виготовлення бетонних виробів охарактеризовано в роботах [1—5]. Головним фактором, який визначає пружні властивості бетонної суміші у разі ущільнення відповідно до висунутої гіпотези, є невидане з неї повітря, яке з'єднується у єдину систему каналами, що утворюються в результаті розриву суцільності середовища між його часточками. Утримуване у бетонній суміші повітря має найбільшу здатність до деформування у порівнянні з її твердою та рідкою фазами. Згідно з гіпотезою та завдяки використанню законів деформації газу визначені конкретні кількісні значення пружних характеристик бетонної суміші. При цьому прийняті початкові припущення: об'єм повітря, що знаходиться у бетонній суміші, за атмосферного тиску  $p_{atm}$ , буде  $V_0$ . Під дією статичного тиску  $p_{stat}$  ущільнювального пристрою на бетонну суміш виникає тиск  $p_{atm} + p_{stat}$ . Тоді за умови ізотермічного стиснення об'єм повітря складе  $V_{stys} = V_0 - DV_{stys}$ . Оскільки площа  $S$  поперечного перерізу робочого органу ущільнювального пристрою постійна, то можна замінити значення об'єму зведеною висотою  $h$  стовпчика повітря у бетонній суміші. При цьому жорсткість  $C_b$  стовпчика повітря буде визначатися як відношення приросту сили  $dQ$ , діючої на стовпчик, до приросту його власної висоти, тобто

$$C_b = dQ/dh. \quad (1)$$

Після інтегрування виразу (1) та простих перетворень отримано залежність

$$C_b = \frac{S(p_{atm} + p_{stat})^2}{p_{stat}h_b\varepsilon}, \quad (2)$$

де  $\varepsilon$  — пористість бетонної суміші,  $h_b$  — висота стовпчика бетону.

Для врахування власної маси бетонної суміші розглянуто жорсткість  $i$ -го прошарку бетонної суміші одиничної товщини [2]

$$C_b = \frac{S(p_{atm} + p_{stat} + \rho g x)^2}{p_{atm}h_b\varepsilon}, \quad (3)$$

де  $\rho$  — густина суміші;  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  — прискорення вільного падіння;  $x$  — поточна координата вздовж товщини  $i$ -го прошарку суміші.

Інтегральна жорсткість стовпчика бетонної суміші з урахуванням навантаження від його маси

$$C_b = \frac{S(p_{atm} + p_{stat})(p_{atm} + p_{stat} + \rho g h_b)}{p_{atm}h_b\varepsilon}. \quad (4)$$

У межах малих деформацій бетонних сумішей, що спостерігаються під час ущільнення матеріалу виробу, можна використати закон Гука. Тоді аналітичний вираз для миттєвого чи динамічного модуля пружності  $E$  буде

$$E = \frac{S(p_{atm} + p_{stat})(p_{atm} + p_{stat} + \rho g h_b)}{p_{atm}\varepsilon} = \frac{C_b h_b}{S}. \quad (5)$$

Відповідно до формули (5) динамічний модуль пружності суміші — умовна величина, котра залежить від умов формування суміші, висоти бетонного виробу та ступеня ущільнення матеріалу. Оскільки напружений стан матеріалу бетонної суміші пов'язаний з його деформацією, то це дозволяє встановити зв'язок між динамічним тиском  $p_{dyn}$  й жорсткістю матеріалу суміші  $C_b$ . Нехтуючи впливом в'язко-пластичних властивостей бетонної суміші та вважаючи можливим у межах малих деформацій застосовувати закон Гука, отримано вираз, що дозволяє встановити величину динамічного тиску

$$p_{dyn} = E \frac{A}{h_b} = \frac{C_b A}{S}, \quad (6)$$

де  $A$  — амплітуда коливань робочого органу ущільнювального пристрою під час виготовлення бетонного виробу.

Порівняння визначених з експериментів та за залежністю (6) величин динамічного тиску для товщини бетонної суміші 0,05; 0,1; 0,2 м, свідчить про досить високу збіжність їх значень для зазначених товщин.

### Результати дослідження

На власну частоту коливань суміші під час її ущільнення в процесі формування бетонного виробу впливає радіус бульбашок стислого у суміші повітря. Наявність резонансів бульбашок стислого у суміші повітря визначає режим збудження останньої. Для реалізації ефекту вібраційного кипіння (вібраційного вибуху) необхідно збуджувати у досліджуваній системі «вібростанція—оброблювальне середовище—привантаження» коливання високої частоти, які розриватимуть бульбашки. Це суттєво підвищує якість ущільнення бетонної суміші у процесі виготовлення бетонних виробів.

Для визначення залежності радіуса бульбашки повітря у бетонній суміші від глибини її занурення використано такі припущення.

Біля поверхні суміші діє сумарний тиск

$$P_{atm} + p_{stat} = p_{sum}. \quad (7)$$

При незмінній температурі до повітря бульбашки можна застосувати закон Бойля-Маріотта, тобто

$$p_1 V_1 = p_2 V_2, \quad (8)$$

де  $p$ ,  $V_i$  — відповідно тиск і об'єм.

На глибині  $h$  занурення у суміш, рахуючи від її поверхні, тиск

$$p_2 = p_{atm} + p_{stat} + \rho gh, \quad (9)$$

де  $h$  — глибина занурення у суміш, рахуючи від її поверхні.

Об'єм бульбашки повітря біля поверхні суміші

$$V_1 = \frac{4}{3} \pi r_1^3 \quad \text{для } h = 0 \rightarrow r_1; \quad \text{для } h \neq 0 \rightarrow \frac{r_1}{n^3}, \quad (10)$$

а на глибині  $h$

$$V_2 = \frac{4}{3} \pi \left( \frac{r_1}{n} \right)^3 = \frac{4}{3} \cdot \frac{\pi}{n^3} \cdot r_1^3 = \frac{V_1}{n^3}, \quad (11)$$

де  $n$  — коефіцієнт зміни об'єму бульбашки від глибини занурення у бетонну суміш.

Після підстановки у рівняння ізобаричного процесу та відповідних перетворень значення коефіцієнта  $n$  зміни об'єму бульбашки від глибини занурення у суміш при виготовленні бетонних виробів визначається як

$$n = \sqrt[3]{\frac{\rho gh}{p + p_{atm}} + 1}. \quad (12)$$

Аналіз рівняння (12) свідчить, що радіус  $r$  бульбашки об'єму  $V$  повітря, стисненого у бетонній суміші, залежить від: атмосферного тиску  $p_{atm}$ , тиску привантаження  $p_{stat}$ , щільності суміші  $\rho$  та глибини  $h$  занурення в останню.

Тобто можна виявити залежність величини бульбашки повітря у бетонній суміші на глибині як функцію

$$r = f(\rho, h, p, p_{atm}). \quad (13)$$

Для виявлення фізико-механічних закономірностей ущільнення суміші під час виготовлення бетонних виробів відповідно до залежності (11) виконано моделювання в програмі Excel.

Вихідними умовами є густина бетонної суміші 1900...2500 кг/м<sup>3</sup>, висота прошарку бетонної суміші 0,01...0,5 м та співвідношення між об'ємом бульбашки повітря на поверхні бетонної суміші до об'єму бульбашки на глибині прошарку бетонної суміші від 1,02 до 1,11.

За результатами числового моделювання отримано графічні залежності (рис. 1—3).

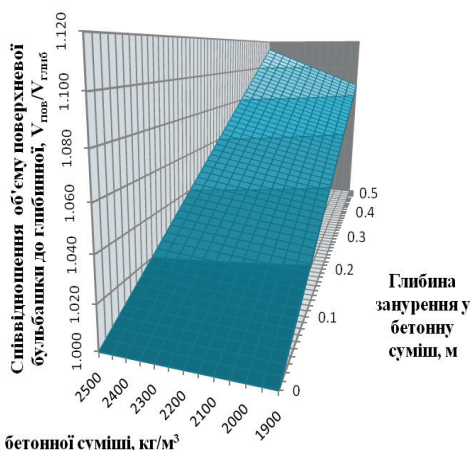


Рис. 1. Залежність зміни величини співвідношення об'єму бульбашки на поверхні до об'єму бульбашки на глибині з тиском  $1,1 \cdot 10^5$  Па

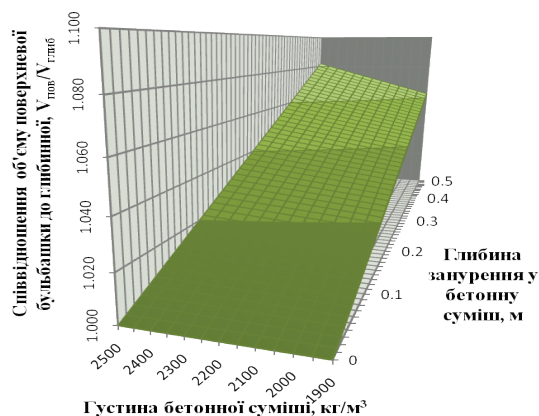


Рис. 2. Залежність зміни величини співвідношення об'єму бульбашки на поверхні до об'єму бульбашки на глибині за тиску  $1,5 \cdot 10^5$  Па

Аналіз результатів моделювання свідчить, що зі збільшенням тиску  $p_{stat}$  відбувається збільшення об'єму бульбашки  $V_b$  на глибині  $h$ ; а також чим більше густина бетонної суміші  $\rho$ , тим менший об'єм бульбашки повітря на глибині  $V_b$ .

Коливання зменшення об'єму бульбашки на глибині 0,5 м для тиску  $1,1 \cdot 10^5$  Па становили 8,5...11 % від початкового об'єму бульбашки на поверхні, для тиску  $1,5 \cdot 10^5$  Па — 6,2...8,2 %, для тиску  $2,0 \cdot 10^5$  Па 4,7...6,1 % відповідно від початкового об'єму бульбашки на поверхні. Площина залежності співвідношення об'єму бульбашки повітря на поверхні до об'єму на глибині крутіша на 35 % з тиском  $1,5 \cdot 10^5$  Па та на 80 % з тиском  $1,1 \cdot 10^5$  Па відповідно від площини з тиском  $2,0 \cdot 10^5$  Па, що приводить до збільшення величини співвідношення об'ємів бульбашки на поверхні до об'єму бульбашки на глибині суміші зі зменшенням тиску привантаження.

Наявність резонансів бульбашок затисненого у суміші повітря вимагає збудження у системі «вібрація—оброблюване середовище—привантаження» коливань високої частоти, що можуть просто «розривати» ці бульбашки (ефект «вібраційного кипіння» чи «вібраційного вибуху»).

### Висновки

1. Розроблено математичну модель залежності величини бульбашки повітря, зануреної в ущільнювану суміш, що, під час виготовлення бетонних виробів, від впливу глибини занурення, сумарної дії величини тиску привантаження та густини суміші.

2. Виявлено, що на  $1 \cdot 10^5$  Па приросту тиску привантаження величина співвідношення об'єму бульбашки повітря на поверхні суміші до величини об'єму бульбашки на глибині 0,5 м для сумішей з густиною 1900...2500  $\text{кг}/\text{м}^3$  змінюється несуттєво, а саме  $\Delta V \approx 5$  %.

Аналіз моделювання показав, що зі збільшенням тиску привантаження в межах  $1 \cdot 10^5$  Па коливання зменшення об'єму бульбашки на глибині 0,5 м зменшується від 2,5 % до 1,4 % для бетонних сумішей з густиною 1900...2500  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Руденко И. Ф. Упругие и неупругие силы сопротивления бетонной смеси колебаниям / И. Ф. Руденко. — В кн. : Технология виброформирования железобетонных изделий. — М. : Стройиздат, 1970. — С. 19—33.
2. Руденко И. Ф. Формование изделий поверхностными устройствами / И. Ф. Руденко. — М. : Изд. литературы по строительству. — 1972. — 104 с.
3. Ратушняк Г. С. Вибросилова технологія формування декоративних бетонних виробів / Г. С. Ратушняк, Н. М. Слободян. — Вінниця : УНІВЕРСУМ — Вінниця, 2007. — 161 с. — ISBN 978-966-641-221-1.
4. Дудар І. Н. Теоретичні основи технології виробів із пресованих бетонів : моног. / І. Н. Дудар // Вінниця : УНІВЕРСУМ—Вінниця, 2006. — 89 с. — ISBN 966-641-163-6.
5. Дворкин Л. И. Проектирование составов бетонов с заданными свойствами / Л. Дворкин, О. Дворкин. — Ровно : Изд-во РГТУ, 1999. — 202 с.

Рекомендована кафедрою містобудування та архітектури

Стаття надійшла до редакції 4.11.10  
Рекомендована до друку 12.01.10

**Бікс Юрій Семенович** — аспірант кафедри містобудування та архітектури;

**Ратушняк Георгій Сергійович** — директор Інституту будівництва, теплоенергетики та газопостачання;

**Слободян Наталія Михайлівна** — доцент кафедри теплоенергетики та газопостачання.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

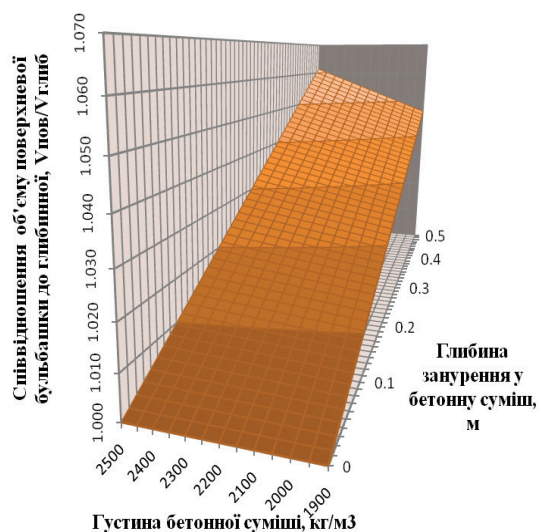


Рис. 3. Залежність зміни величини співвідношення об'єму бульбашки на поверхні до об'єму бульбашки на глибині за тиску  $2,0 \cdot 10^5$  Па