

## ЗАКОНОМІРНОСТІ РОЗПОДІЛЕННЯ ТИСКУ ПО ВИСОТІ БЕТОННОЇ СУМІШІ, ЩО УЩІЛЬНЮЄТЬСЯ

І. Н. Дудар, Ю. С. Бікс

*Теоретично обґрунтовані закономірності, які дозволяють точніше прогнозувати як характер залежності, так і абсолютні значення розподілення тисків по висоті бетонного суміші, що ущільнюється. Запропоновано експериментальну установку для виявлення закономірності розподілу надлишкового тиску в масиві бетонного суміші по висоті. Наведено математичне моделювання динаміки робочого процесу ущільнення бетонної суміші, що складається із системи диференціальних рівнянь, з урахуванням низки припущень.*

*Теоретически обоснованы закономерности, которые позволяют точнее прогнозировать как характер зависимости, так и абсолютные значения распределения давлений по высоте уплотняемого бетонного изделия. Предложена экспериментальная установка для выявления закономерности распределения избыточного давления в массиве бетонного изделия по высоте. Приведено математическое моделирование динамики рабочего процесса уплотнения бетонной смеси, которая состоит из системы дифференциальных уравнений, с учётом ряда допущений.*

*Dependencies which enables to predict more precisely as well as character of dependency and absolute value of pressures distribution by the height of compressed concrete item has been theoretically grounded. Experimental device for regularity clarification of extra pressure distribution by the height of concrete item has been proposed. Mathematical modeling of operational process's dynamic of compressed concrete mixture has been lead with differential equations by taking into account some assumptions.*

### Вступ

Закономірності розподілення тисків по висоті бетонного суміші, що виготовляється в процесі пресування, досліджувались в роботах [1, 2, 3, 4]. Знання характеру цих закономірностей дозволяє оцінити величину тиску, що передається на стінки форми від суміші, що ущільнюється. Величини тисків в бетоні при його ущільненні враховуються при проектуванні інвентарної опалубки та при забезпеченні технологічного процесу монолітного бетонування на будівельному майданчику. Установлені залежності [1, 2, 3, 4] не в повній мірі характеризують закономірності розподілення тисків по висоті масиву бетонної суміші, що ущільнюється. Відсутність достатньої кількості достовірних та теоретично обґрунтованих експериментальних досліджень унеможливило врахування сукупності всіх факторів впливу на технологічний процес виготовлення залізобетонних виробів. В зв'язку з цим виникає нагальна необхідність теоретично обґрунтувати конструктивні параметри устаткування для експериментального дослідження закономірностей розподілу тисків по висоті масиву бетонної суміші, що ущільнюється.

### Постановка задачі дослідження

Теоретичне дослідження характеру розподілення тисків по висоті масиву бетонної суміші, що ущільнюється наведено у роботі [5]. Розглянуто найпоширеніший випадок стиснення цементного тіста в жорсткій металевій формі. В цьому випадку внаслідок великої жорсткості форми будуть відсутні поперечні деформації [5], тобто

$$\delta_x = \delta_y = 0. \quad (1)$$

де  $\delta_x, \delta_y$  – поперечні деформації у формі по напрямкам  $x$  та  $y$ .

Під час осідання бетонної суміші тертя, що виникає на поверхні стінок, буде сприймати частину вертикального тиску  $P_z$ . В зв'язку з цим напруження у цементному тісті, які перпендикулярні з нормальними можна виразити як [5]

$$P_x = P_y = \xi P_z, \quad (2)$$

де  $\xi$ - коефіцієнт бокового тиску,  
 $P_x, P_y$  – бокові тиски суміші на стінку форми.

Закономірність розподілу тиску в бетонній суміші густиною  $\gamma_b$  розглядається в прямокутному перерізі з довжиною  $a$ , шириною  $b$  та висотою  $h$  (рис. 1). Для цього виділено двома горизонтальними площинами, що перпендикулярні до висоти  $h$ , елемент суміші товщиною  $dx$ . Даний елемент знаходиться під дією сил, що зображені на рис. 1.

Рівняння рівноваги всіх сил відносно осі X [5] має вигляд

$$\gamma_b ab dz + P_z ab - (P_z + dP_z) ab - \tau_h (2a + 2b) \quad (3)$$

Опір тертю по боковій поверхні бетонної суміші дорівнює

$$\tau_h = \xi P_z tg \alpha_c, \quad (4)$$

де  $\xi$  – коефіцієнт бокового тиску суміші;  
 $\alpha_c$  – коефіцієнт тертя суміші по стінці форми.

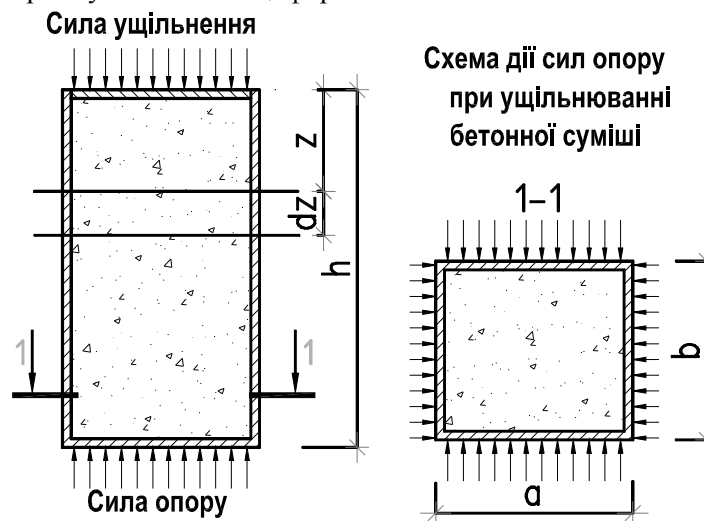


Рис. 1. Схема до визначення сил, що діють на елементарний прошарок масиву бетонної суміші  $dz$ , що ущільнюється

Достовірність висунутої гіпотези про розподілення тиску в масиві масиву бетонної суміші, що ущільнюється, може бути установлена шляхом порівняння величини тиску, що отримана в результаті чисельного моделювання за теоретичними залежностями, з експериментальними даними. Після відповідного перетворення рівняння (3) отримує вигляд

$$dz(\gamma_b - \xi P_z tg \alpha_c \frac{L}{S}) = dP_z, \quad (5)$$

де  $L=2(a+b)$  – периметр перерізу зразка;  
 $S=a \cdot b$  – площа перерізу зразка.

Для чисельного моделювання залежності розподілу величини тиску привантаження по висоті масиву бетонної суміші, що ущільнюється отримано залежність (6) після послідовних перетворень рівняння (5)

$$P_z = \frac{1}{e^{xK_{s.f.}} \cdot K_{s.f.}} [PK_{s.f.} + \gamma_b (e^{xK_{s.f.}} - 1)], \quad (6)$$

де  $K_{s.f.} = \xi tg \alpha_c \frac{L}{S}$ , коефіцієнт структури цементного тіста та впливу форми.

### Результати досліджень

Базуючись на аналітичній залежності (10) при моделюванні розподілу тиску по висоті масиву бетонної суміші під час ущільнення, при початкових умовах  $P_{надл} = 5$  МПа, глибини занурення  $h = 1,2$  м, поперечному перерізу форми  $20 \times 20$  см отримано криву розподілу тиску, що зображено на рис. 2.

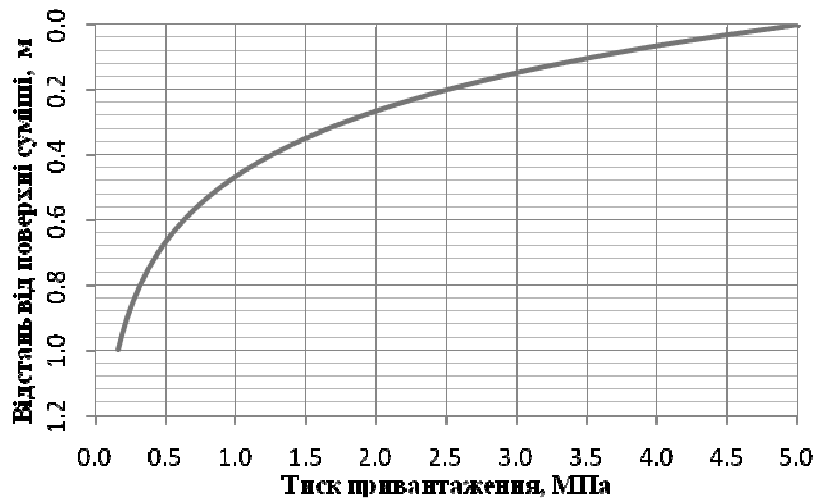


Рис.2. Значення величини тиску привантаження від зміни відстані від поверхні суміші

Аналіз кривої, що наведена на рис. 2 свідчить про те, що із збільшенням відстані від поверхні вглиб масиву бетонної суміші відбувається згасання величини тиску привантаження в ній, та на глибині 1 м сягає менше 5 % від початкового значення  $P_{\text{надл}} = 5 \text{ МПа}$ .

Для експериментального підтвердження отриманої закономірності (рис. 2) запропоновано дослідну установку для вимірювання тиску в масиві бетонної суміші [7].

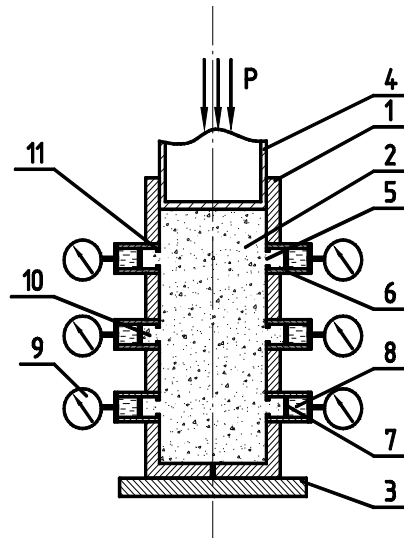


Рис. 3. Схема установки для вимірювання тиску в масиві бетонної суміші, що ущільнюється

Установка складається з роз'ємного корпусу 1 з порожниною 2 для заповнення випробувальною бетонною сумішшю. В нижній частині порожнини 1 розміщено станину 3, а в верхній – навантажуючий пристрій у вигляді пуансона 4. Пуансон 4 з'єднаний з силовим приводом для передачі зусилля на випробувальну бетонну суміш. На протилежних бокових поверхнях корпусу 1 симетрично вверху, посередині та внизу виконані отвори 5. Навпроти цих отворів на зовнішній поверхні корпусу 1 встановлені робочі гідроциліндри 6, в кожному з яких розміщено рухома діафрагма 7, яка утворює піддіафрагменну 10 та наддіафрагменну 8 порожнину. Причому кожна наддіафрагменна порожнина 8 заповнена робочою рідиною та з'єднана з показником тиску 9, а піддіафрагменна порожнина 10 через обмежувальне кільце руху 11 гідралічно з'єднана з порожниною 2, яка слугує для розміщення випробувальної бетонної суміші. Установка працює наступним чином. У порожнину 2 роз'ємного корпусу 1 заливається бетонна суміш. Пуансон 4 під дією тиску силової установки приводиться в дію. Суміш ущільнюється. Надлишковий тиск, який зростає у бетонній суміші, передається через отвори 5 у

піддіафрагменну порожнину 10 гідроциліндра 6, передає тиск на рухому діафрагму 7. Переміщення діафрагми 7 з піддіафрагменної порожнини 10 у корпус установки 2 обмежене обмежувальним кільцем руху 11. Надлишковий тиск через рухому діафрагму 7 передається на робочу рідину наддіафрагменної порожнини 8. Показання надлишкового тиску робочої рідини в наддіафрагменній порожнині 8 реєструється показником тиску 9. Після зняття показників тиску з показників тиску 9 по висоті з обох сторін зразка припиняють подачу зусилля на випробувальну бетонну суміш через пуансон 4, що з'єднаний з силовим приводом.

Для розгляду математичної моделі динаміки робочого процесу запропонованої установки прийнято такі припущення: нехтуються деформації стінок роз'ємного корпусу 1 експериментальної установки та деформації крупного заповнювача бетонної суміші, внаслідок їх незначної величини; температура бетонної суміші в порожнині 2 та робочої рідини в наддіафрагменній порожнині 8 приймається сталою; коефіцієнт витрат рідкої фази бетонної суміші через отвори 5 сталий; модуль пружності рідкої фази бетонної суміші та модуль пружності робочої рідини наддіафрагменної порожнини 8 прийнято сталим.

З урахуванням прийнятих припущень система диференціальних рівнянь для реалізації математичної моделі динаміки робочого процесу установки для вимірювання тиску в масиві бетонної суміші може бути подана у вигляді [6]

$$m_{mixt} \frac{d^2 z}{dt^2} = P_1 F_p - \alpha_{mixt} \frac{dz}{dt} - R_{fr.mixt}, \quad (7)$$

$$F_p \frac{dz}{dt} = \mu f_{dr} \sqrt{P_1 - P_2} + \frac{W_d}{E_d} \frac{dP_1}{dt}, \quad (8)$$

$$m_{liq} \frac{d^2 y}{dt^2} = P_3 F_p - \alpha_{liq} \frac{dy}{dt} - R_{fr.liq} - C(y_0 + y), \quad (9)$$

$$F_p \frac{dy}{dt} = \frac{W_p}{E_p} \frac{dP_3}{dt}, \quad (10)$$

де  $z, y$  – переміщення відповідно вздовж вісі прикладання стискаючого зусилля  $z$  та вздовж осі переміщення робочої рідини наддіафрагменної порожнини 8  $y$ ;

$m_{mixt}, m_{liq}$  – маса відповідно рідкої фази бетонної суміші та робочої рідини наддіафрагменної порожнини 8 в гідроциліндрі 6;

$F_{sp}, F_{cyl}$  – площа робочої поверхні відповідно під навантажуючим пуансоном 4 та гідроциліндра 6;

$\frac{d^2 z}{dt^2}, \frac{dz}{dt}, z$  – прискорення, швидкість та переміщення вздовж осі  $z$ ;

$\frac{d^2 y}{dt^2}, \frac{dy}{dt}, y$  – прискорення, швидкість та переміщення вздовж осі  $y$ ;

$\alpha_{mixt}, \alpha_{liq}$  – коефіцієнти відносного демпфування відповідно бетонної суміші та робочої рідини наддіафрагменної порожнини 8 гідроциліндра 6;

$R_{fr.mixt}, R_{fr.liq}$  – сили сухого тертя відповідно бетонної суміші та робочої рідини наддіафрагменної порожнини 8 гідроциліндра 6;

$P_1, P_2, P_3$  – початковий тиск відповідно рідкої фази бетонної суміші, на вході у отвір 5 та робочої рідини гідроциліндра 6;

$W_{mixt}, W_{liq}$  – об'єм відповідно стиснутої рідкої фази бетонної суміші в порожнині 2 та робочої рідини гідроциліндра 6;

$C$  – сумарна жорсткість пружини робочого органу показника тиску 9;

$f_{dr}$  – ефективна площа отвору 5;

$y_0, y$  – значення відповідно початкової та поточної координати пружини робочого органу показника тиску 9;

$\mu$  – коефіцієнт витрати через отвір 5.

Розв'язок рівнянь (7...10) у програмному комплексі “MATLAB” дозволить отримати конструктивні параметри установки для вимірювання тиску в масиві бетонної суміші, що ущільнюється.

### Висновки

- Результати чисельного моделювання теоретичної закономірності розподілу тиску по висоті масиву бетонної суміші, що ущільнюється свідчать про те, що із збільшенням відстані від поверхні бетонної суміші вглиб, відбувається затухання величини тиску привантаження в ній, так на глибині 1 м сягає менше 5 % від початкового значення  $P_{\text{надл}} = 5 \text{ МПа}$ .
- Запропоновано конструкцію установки для вимірювання тиску в масиві бетонної суміші, що ущільнюється. Для визначення її конструктивно-технологічних параметрів розроблена математична модель динаміки робочого процесу за допомогою системи диференціальних рівнянь.
- Практична реалізація експерименту із визначення тиску в масиві бетонної суміші, що ущільнюється дозволить виявити збіжність з теоретичними розрахунками.

### Список літератури

1. Ахвердов И. Н. Основы физики бетона / Ахвердов И. Н. – М.: Стойиздат, 1981. – 464 с.
2. Свитонский А.В. Разработка и исследование технологии вибропрессования горячих бетонных смесей: Автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.23.05 “Будівельні матеріали та виробы” / А.В. Свитонский. – Минск, 1978. – 20 с.
3. Дворкин Л. И. Основы бетоноведения / Л. Дворкин, О. Дворкин. – СПб: ООО “Строй-Бетон”, 2006. – 692 с. – ISBN 590319702-7.
4. Будівельне матеріалознавство / [Кривенко П.В., Пушкарьова К.К., В.Б. Барановський та ін.]; за ред. П.В. Кривенко. – К.: ТОВ УВПК “Ексоб”, 2004. – 702 с.
5. Дудар І.Н. Теоретичні основи технології виробів із пресованих бетонів / Дудар І.Н. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 89 с. – (Монографія). – ISBN 966-641-163-6.
6. Ратушняк Г. С. Вібросилова технологія формування декоративних бетонних виробів / Г. С. Ратушняк, Н. М. Слободян. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – 161 с. – ISBN 978-966-641-221-1
7. Пат. 53612 Україна, МПК G01N 3/10 Установка для вимірювання тиску в масиві бетонної суміші / Дудар І.Н., Бікс Ю.С.; заявник та власник Вінницький нац. техн. уні-т. – №201004690; заявл. 20.04.2010; опубл. 11.10.2010, Бюл. № 19/2010.

*Дудар Ігор Дудар Никифорович* – завідувач кафедри Містобудування та архітектури Вінницького національного технічного університету.

*Бікс Юрій Семенович* – аспірант Вінницького національного технічного університету.