

УДК 534

Б.В.Корнійчук, асистент КНУБА

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ПАРАМЕТРІВ ВІБРОУСТАНОВКИ З ВЕРТИКАЛЬНИМ РОЗТАШУВАННЯМ ЗБУДНИКІВ КОЛИВАНЬ

Постановка задач досліджень. Проведені аналітичні дослідження [1] виявили суттєву відмінність руху часточок бетонної суміші в формі бетонного кільця у порівнянні із традиційним ущільненням, як при вертикальній вібрації [2,3,4] так і при реалізації горизонтальних [5] або просторових коливань [6]. Важливими параметрами у випадку даного дослідження є поряд із визначеннями амплітуд, тиску, потужності, знаходження таких параметрів, як кут між положеннями дебалансів та оцінка сил тертя суміші об форму. Виходячи із результатів досліджень [1] задачами експериментів досліджень являються:

- виявлення характеру зміни амплітуд коливань по висоті форми та встановлення їх числових значень;
- визначення тиску бетонної форми на борта форми;
- оцінка впливу кута зсуву фаз між положеннями дебалансів вібраторів на робочий рух установки та фіксація часу ущільнення бетонної суміші при різних силових навантаженнях.

Методика досліджень. Визначення більшості параметрів робочого процесу: амплітуди коливань, часу ущільнення, потужності можливо безпосередньо існуючими методами та вибраними датчиками і реєструючою апаратурою.

Основним є дві моделі – дискретна [3] та континуальна [7, 8, 9]. За дискретною моделлю тиск p_d визначається за формулою [3]:

$$p_d = \frac{m_0 \cdot \omega^2 \cdot X_{p.o.}}{S} \cdot \sqrt{1 + (2 \cdot \xi \cdot r)^2} \cdot \aleph, \quad (1)$$

де m_0 – маса бетонної суміші;

ω – кутова частота вимушених коливань;

$X_{p.o.}$ – амплітуда коливань робочого органу;

S – площа перерізу суміші на якій визначається тиск;

ξ – безрозмірний коефіцієнт згасання коливань;

r – співвідношення вимушених (ω) і власних (ω_0) частот коливань;

$\aleph = \frac{X_c}{X_{p.o.}}$ – відношення амплітуд коливань суміші (X_c) до амплітуди робочого органу ($X_{p.o.}$).

Правомочність формули (1) перевірялося в роботі [3] двома способами: порівнянням числових значень тиску дійсних і розрахункових, і способом співставлення коефіцієнтів в'язкого опору, що визначаються із рішення рівнянь вимушених гармонійних коливань з урахуванням в'язкого опору бетонної суміші і добротності піка в зоні резонансу. В цитуємії роботі [3] відмічається, що фактичні значення тиску бетонної суміші на елементи форми (експерименти проводилися на вібротрампаді з формою, що мала висоту $h = 0,4-0,5$ м на бортах якої встановлювалися датчики тиску) співпадають і навіть перевищують розрахункові значення за умови, як вказує автор роботи [3], без урахування коефіцієнта динамічності:

$$k_d = \sqrt{1 + (2 \cdot \xi \cdot r)^2} \cdot \aleph.$$



За континуальною моделлю можна відмітити дві залежності – для частотозалежного і частотонезалежного опору бетонної суміші. Для частотозалежного опору [10] формула для визначення напруження має вигляд:

$$\sigma = E \cdot \xi + \eta \cdot \dot{\xi}, \quad (2)$$

де E , ξ і η – модуль пружності, деформація і коефіцієнт в'язкості;

$$E = \frac{\rho \cdot \omega^2 \cdot (K^2 - \alpha^2)}{\sqrt{(K^4 - \alpha^4)^2 + 4 \cdot K^2 \cdot \alpha^2 \cdot (\alpha^2 + K^2)^2}};$$

$$\eta = 2 \cdot E \cdot \frac{\alpha}{c \cdot (K^2 - \alpha^2)};$$

K – хвильове число $\left(K = \frac{\omega}{c}\right)$; ρ – щільність, λ – довжина хвилі; c – швидкість розповсюдження хвиль; α – коефіцієнт згасання.

Середні значення для частоти коливань $\omega = 314 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ мають значення [10]

$$\rho = 2000 \dots 2400 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \lambda = 90 \text{ см}; c = 46 \frac{\text{м}}{\text{с}}; \alpha = 0,01 \text{ см}^{-1}; E = 45 \cdot 10^6 \frac{\text{даН}}{\text{см}^2}; \eta = 4,5 \cdot 10^4 \text{ нЗ}.$$

При частотонезалежному опорі [7] формула для визначення напруження має вигляд:

$$\sigma = E \cdot \xi + i \cdot E \cdot \xi \cdot \gamma \quad (3)$$

де i – уявна одиниця, що вказує на поворот вектора непружної складової $E \cdot \xi \cdot \gamma$ відносно пружної $E \cdot \xi$ на кут $\frac{\pi}{2}$.

Формула (3) для отримання тиску в зоні контакту приводиться до виду [7]:

$$\sigma = \frac{m_c \cdot X_c \cdot \omega^2}{S} \cdot \sqrt{a^2 + d^2},$$

де a , d – хвильові коефіцієнти:

$$a = \frac{\alpha \cdot \text{Sh}2\alpha \cdot h + \beta \cdot \sin2\beta \cdot h}{h \cdot (\alpha^2 + \beta^2) \cdot [\text{ch}2\alpha \cdot h + \cos2\beta \cdot h]};$$

$$d = \frac{\alpha \cdot \sin2\beta \cdot h - \beta \cdot \text{Sh}2\alpha \cdot h}{h \cdot (\alpha^2 + \beta^2) \cdot [\text{ch}2\alpha \cdot h + \cos2\beta \cdot h]};$$

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{1 + \gamma^2} - 1}{2 \cdot (1 + \gamma^2)}};$$

$$\beta = \frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{1 + \gamma^2} + 1}{2 \cdot (1 + \gamma^2)}};$$

де c – швидкість розповсюдження хвиль в стовпі суміші висотою h ;
 γ – коефіцієнт опору.

У якості розрахункової приймається формула (3) із допущеннями, що хвильові явища в площі дії віброоргану відсутні, оскільки товщина виробу є незначною у порівнянні із довжиною хвилі, а в такому випадку [7] таке припущення є справедливим. Отже для визначення тиску в зоні дії силового навантаження визначається амплітуда коливань X_c , переріз S і маса m'_c на яку діє це навантаження. Співвідношення $\frac{\omega}{c}$ приймається за даними робіт [11,10], що мають експериментальне підтвердження.

При визначенні амплітуди коливань форми застосовуються індукційні датчики в комплекті із реєструючою апаратурою та вібрографом. Записи проводили як для сталого

режиму вібрації, так і в режимі згасаючих коливань. Для отримання вільних згасаючих коливань форми електродвигун різко зупинили шляхом включення проти струмам за методикою, що приведена в роботі [12], в результаті чого вплив зовнішньої енергії на згасаючий рух практично був відсутнім.

Вплив бетонної суміші оцінювали за результатами дослідів шляхом порівняння амплітуд коливання незавантаженої форми і завантаженої в сталому режимі, виходячи із передумови, що віброустановка є системою із однією ступінню вільності. За таких умов амплітуда вимушених коливань віброустановки без суміші визначалася за результатами вимірів із сумішшю і без них.

Опис експериментальної установки. Для проведення експериментальних досліджень була запропонована та виготовлена установка за схемою (рис.1).

Загальний вигляд експериментальної установки приведено на рис.1,а. Установка представляє собою зварну конструкцію із зовнішньої та внутрішньої обичайок, що з'єднані між собою спеціальним затискачем, який показаний на рис.1,б. На рис.1,в приведені місця кріплення збудників коливань.

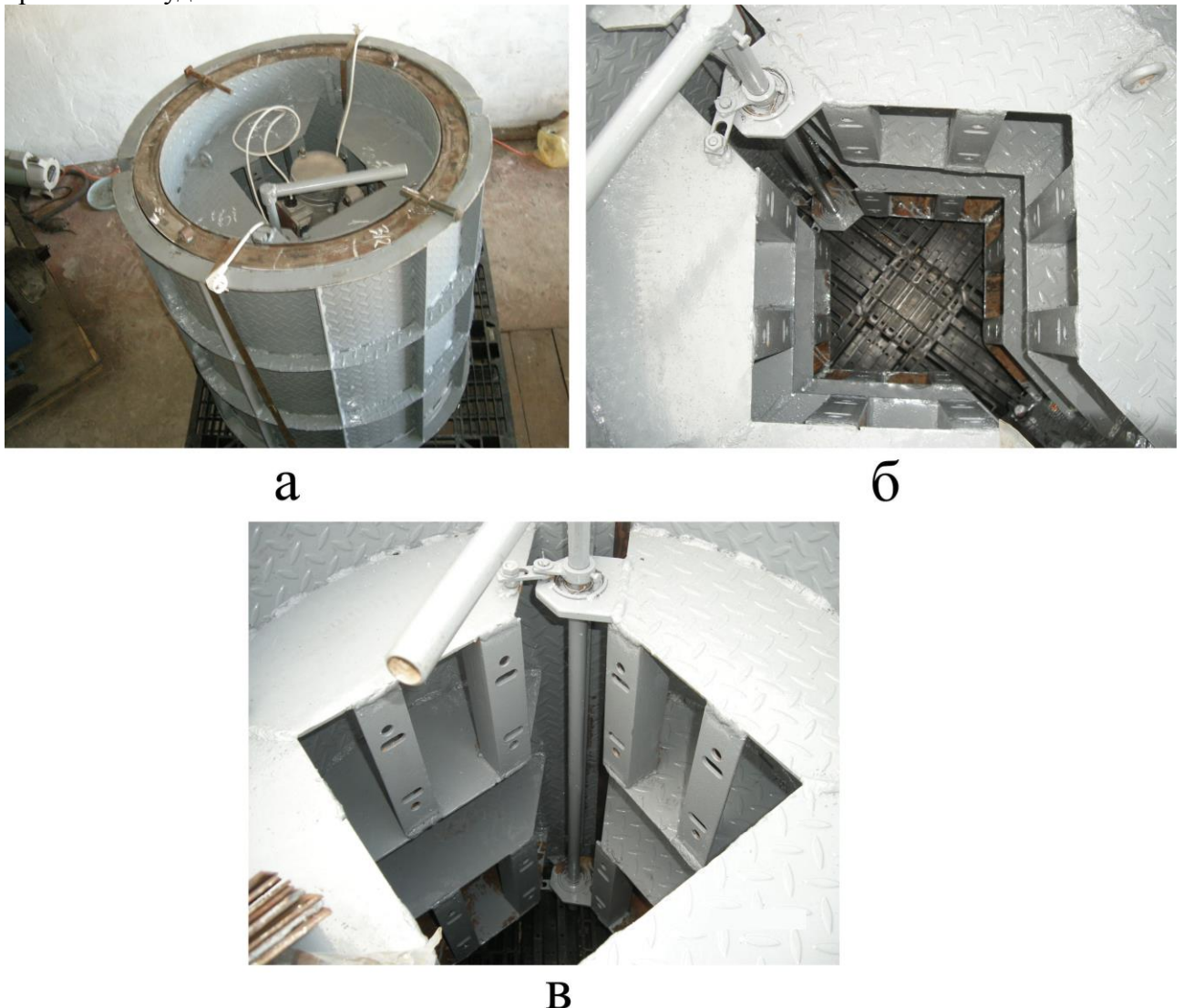


Рисунок 1. Експериментальна установка:

а - загальний вид; б – вид зверху; в – місце кріплення вібраторів.

Основна ідея при визначенні конструкції установки полягала в намаганні наблизити її до можливої реалізації, заявленої в патенті [13] щодо перевірки ефективності зміни діючої сили по висоті установки, що дає рівний розподіл амплітуди коливань по висоті стовпа суміші і отримати допоміжний ефект ущільнення завдяки появі деякого моменту по



діаметру кільця, який полегшує переміщення частинок суміші збільшуючи таким чином рівно щільність виробу по його висоті.

Результати досліджень та їх аналіз. В результаті обробки експериментальних віброграм було встановлено характер руху установки та числові значення амплітуд горизонтальних і вертикальних коливань (табл.1 і табл.2).

Таблиця 1

Числові значення горизонтальних амплітуд коливань по висоті форми

№ серії дослідів	№ досліду	Точка заміру амплітуди, A_i , мм					
		A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
I	1	0,41	0,43	0,44	0,5	0,55	0,58
	2	0,35	0,4	0,43	0,47	0,5	0,57
	3	0,3	0,34	0,36	0,38	0,45	0,51
	4	0,25	0,28	0,31	0,36	0,42	0,45
II	1	0,37	0,41	0,47	0,52	0,54	0,56
	2	0,38	0,42	0,44	0,48	0,53	0,54
	3	0,46	0,48	0,51	0,5	0,56	0,6
	4	0,45	0,5	0,52	0,55	0,52	0,54
	5	0,45	0,48	0,51	0,54	0,58	0,62
III	1	0,5	0,52	0,55	0,58	0,61	0,64
	2	0,45	0,47	0,51	0,53	0,58	0,6
	3	0,43	0,48	0,54	0,58	0,61	0,62
	4	0,4	0,45	0,47	0,5	0,54	0,57
	5	0,37	0,41	0,45	0,48	0,51	0,53

Таблиця 2

Числові значення вертикальних амплітуд коливань по висоті форми

№ серії дослідів	№ досліду	Точка заміру амплітуди, мм				
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
I	1	0,15	0,17	0,19	0,22	0,25
	2	0,14	0,16	0,18	0,20	0,21
	3	0,12	0,13	0,15	0,17	0,19
	4	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14
II	1	0,17	0,18	0,19	0,21	0,22
	2	0,18	0,17	0,16	0,19	0,21
	3	0,19	0,20	0,20	0,21	0,22
	4	0,20	0,21	0,23	0,22	0,24
	5	0,21	0,22	0,23	0,23	0,25
III	1	0,2	0,23	0,24	0,25	0,27
	2	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22
	3	0,16	0,17	0,19	0,20	0,20
	4	0,17	0,18	0,20	0,21	0,24
	5	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19

Перша серія дослідів виконувалася з метою оцінки зміни амплітуди коливань по висоті форми та визначити вплив маси бетонної суміші на амплітуду коливань. Відмічено, що із збільшенням часу вібрації (перший дослід замірявся на 10 с. ущільнення з амплітудою

коливань $A_{сер} = \sum_{i=1}^6 \frac{A_i}{6} = 0,485$ мм) амплітуда коливань дещо зменшується і на завершальній

стадії замірів ($t_{ви} = 60$ с) середня амплітуда коливань в першій точці складає величину

$A_{сер} = 0,345$ мм. Різниця амплітуд коливань має величину 0,12 мм, що складає 35% від

кінцевого значення амплітуди коливань. Зменшення амплітуди коливань для даного досліду очевидно пояснюється двома обставинами. Перше, це збільшення впливу маси суміші із збільшенням щільності, а по друге – такий характер зміни пояснюється тим, що віброустановка для даної серії дослідів працює в зарезонансному режимі. Розрахунки за першою серією досліджень підтверджують ідентичність зміни поведінки установки для всіх точок, де здійснювалися заміри.

Друга серія дослідів ставила за мету оцінити характер і величину зміни амплітуди коливань в залежності від змушуючих сил F_D^H і F_D^B . Перші два дослідів виконувалися для значень F_D^H і F_D^B рівними $3,2 \cdot 10^4$ Н кожна, а третя і четверта серія дослідів для сил $3,4 \cdot 10^4$ Н. За характером і величиною картина розподілу горизонтальних амплітуд коливань практично не змінилася, за винятком точки A_4 в третьому досліді, де заміряна амплітуда коливань (0,50 мм) дещо менша, ніж в точці A_3 (0,51 мм), що пояснюється неточністю вимірювання.

Третя серія дослідів відрізнялася складом бетонної суміші із водоцементним відношенням $\frac{B}{C} = 0,45$, а для першої серії дослідів це відношення складало величину

$$\frac{B}{C} = 0,37.$$

Значення амплітуди вертикальних коливань заміряли на дні форми (X_1) (основа віброустановки), на висоті розташування першого вібратора (X_2), між першим і другим вібратором (X_3) на висоті розташування другого вібратора (X_4) і на верхній частині форми (X_5). На відміну від горизонтальних амплітуд коливань характер розподілу не є стабільним і характерним як для горизонтальних амплітуд. Так, амплітуда коливань на основі форми – характер зміни ідентичний до горизонтальних, тобто по мірі ущільнення амплітуда вертикальних коливань дещо зменшується від значень $X_1 = 0,15$ мм (1^й дослід) до значення $X_2 = 0,1$ мм (див. табл.2). Така зміна пояснюється збільшенням навантаження від ущільнюючого середовища. В той же час для другої серії дослідів в точці дії першого вібробудника (X_2) немає чіткого характеру зміни амплітуди коливань: для першого дослідів $X_2 = 0,18$ мм, а для другого дослідів цієї серії маємо зменшення амплітуди коливань до значення $X_2 = 0,17$ мм. Подібна зміна відмічається для точок X_4 і X_5 для дослідів 3 і 4 третьої серії: $X_4 = 0,21$ мм (2^й дослід) і $X_4 = 0,20$ (3^й дослід). Пояснити таку зміну амплітуди коливань можна за рахунок складних форм коливань в зоні двох вібробудників коливань. Щодо числових значень амплітуд вертикальних коливань, то варто відмітити, що їхнє значення має бути в межах $X_e = 0,18 \dots 0,22$ мм, що для просторових коливань така величина є достатньою для задовільного ущільнення бетонної суміші при наявності горизонтальних коливань в межах $X_2 = 0,4 \dots 0,55$ мм [5].

За результатами цих дослідів і подібних були побудовані графіки зміни параметрів, що замірялися безпосередньо в досліді (амплітуди коливань, час ущільнення, потужність) із фіксацією складу суміші та визначення зміни щільності від початкового до кінцевого. Ці графіки приведені на рис.2 – рис.7.

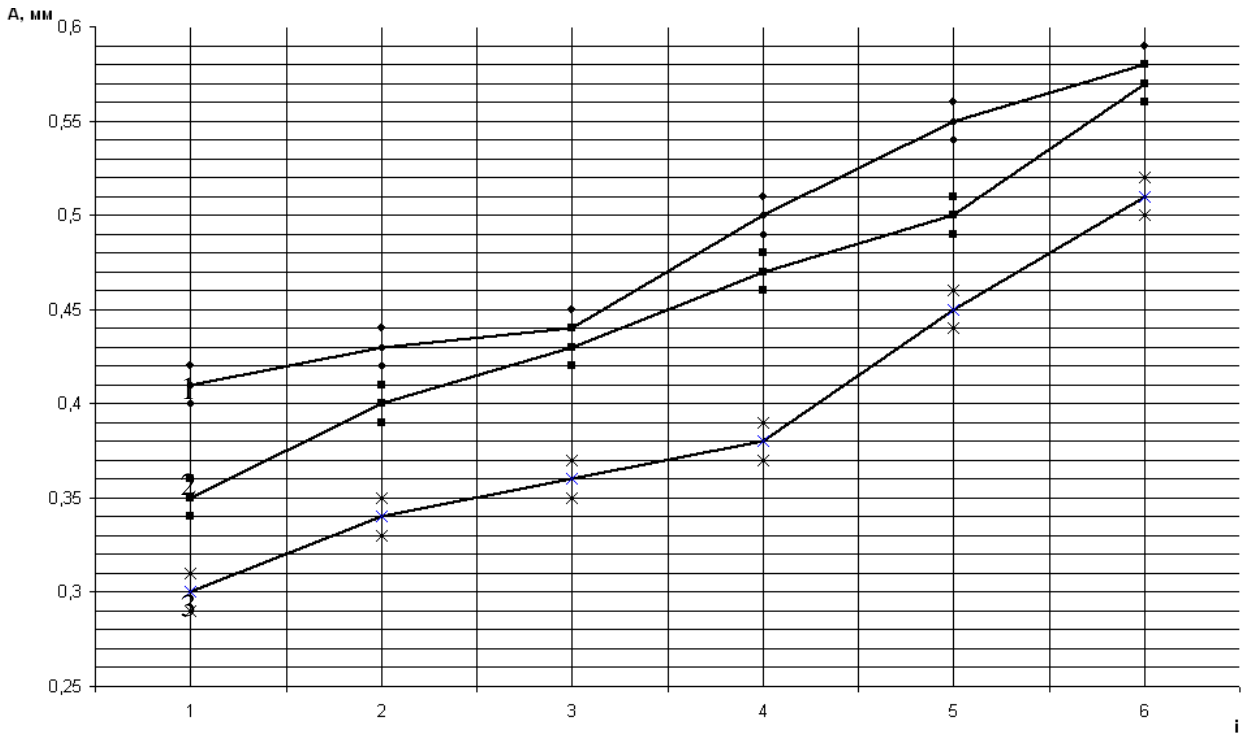


Рисунок 2. Зміна амплітуди горизонтальних коливань по висоті форми в залежності від часу ущільнення для першого (1) другого (2) і третього (3) дослідів першої серії.

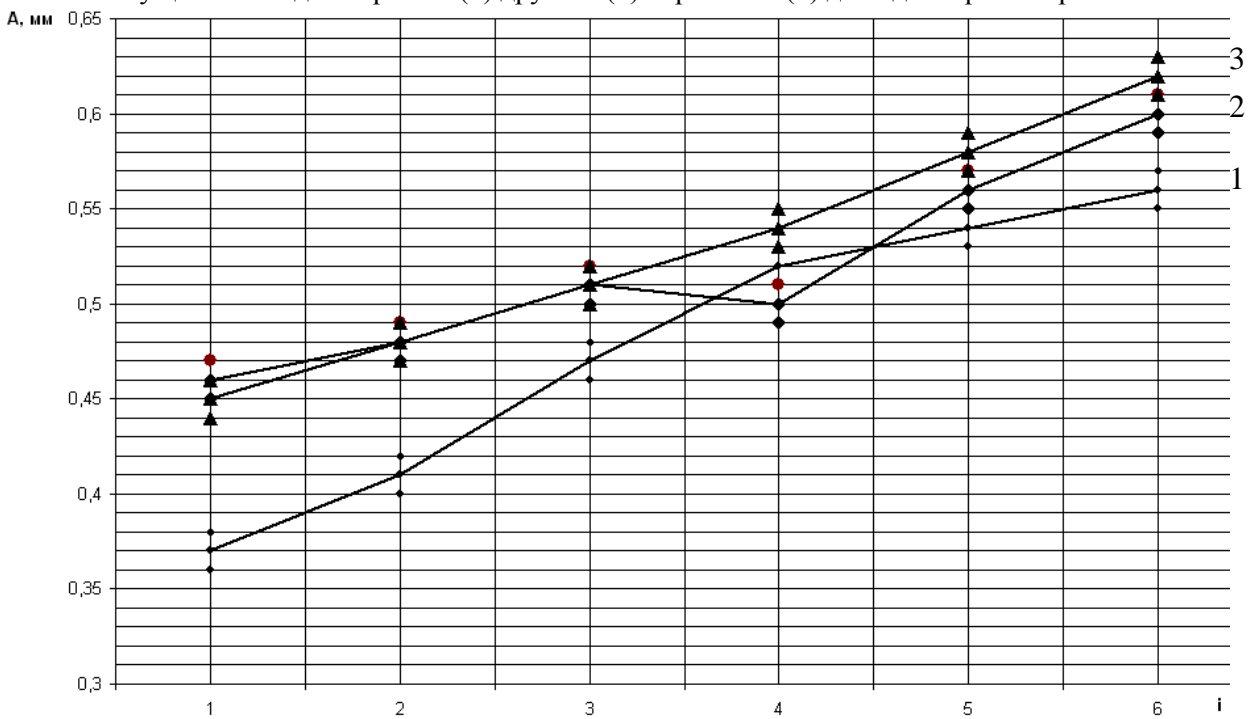


Рисунок 3. Зміна амплітуди горизонтальних коливань по висоті форми в залежності від величини змушуючої сили вібраторів: 1 – перший дослід; 2 – третій дослід; 3 – п'ятий дослід.

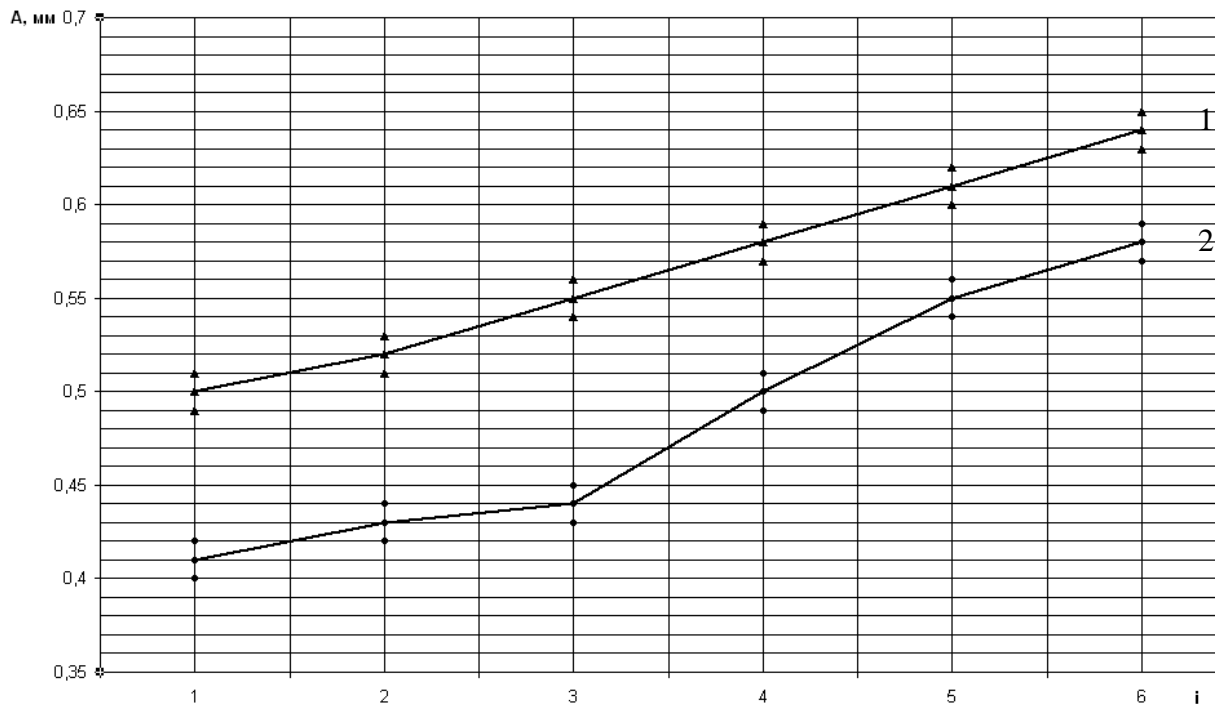


Рисунок 4. Зміна амплітуди горизонтальних коливань по висоті форми в залежності від

водоцементного відношення: 1 - $\frac{B}{Ц} = 0,45$; 2 - $\frac{B}{Ц} = 0,37$.

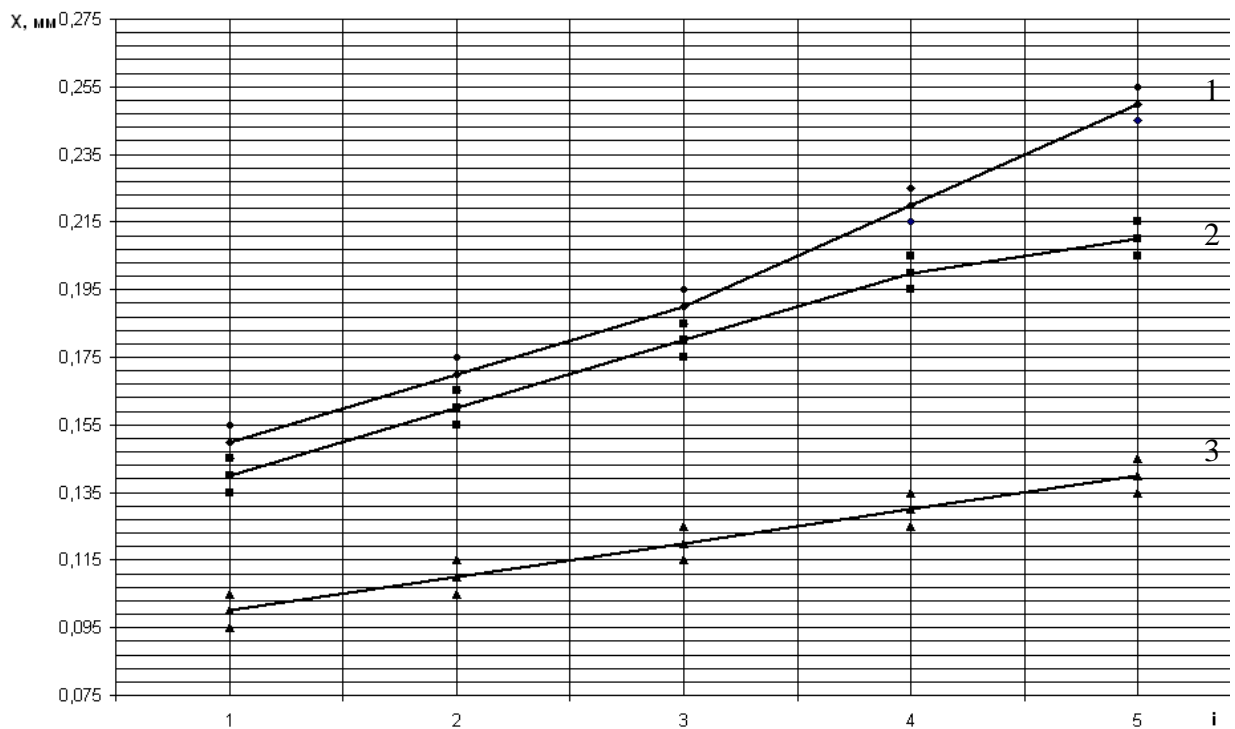


Рисунок 5. Зміна амплітуди вертикальних коливань по висоті форми в залежності від часу ущільнення:

1 – перший дослід, 2 – другий дослід, 3 – четвертий дослід.

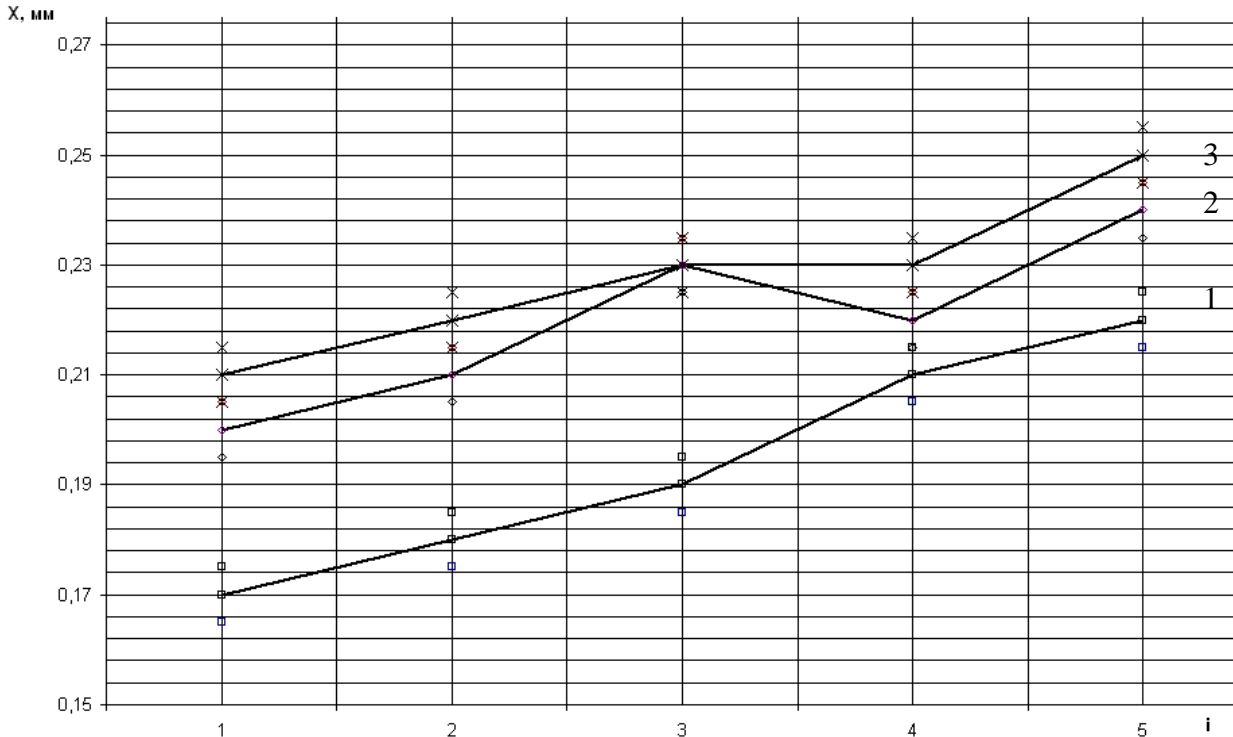


Рисунок 6. Зміна амплітуди вертикальних коливань по висоті форми в залежності від величини змушуючої сили вібраторів: 1 – перший дослід; 2 – четвертий дослід; 3 – п'ятий дослід.

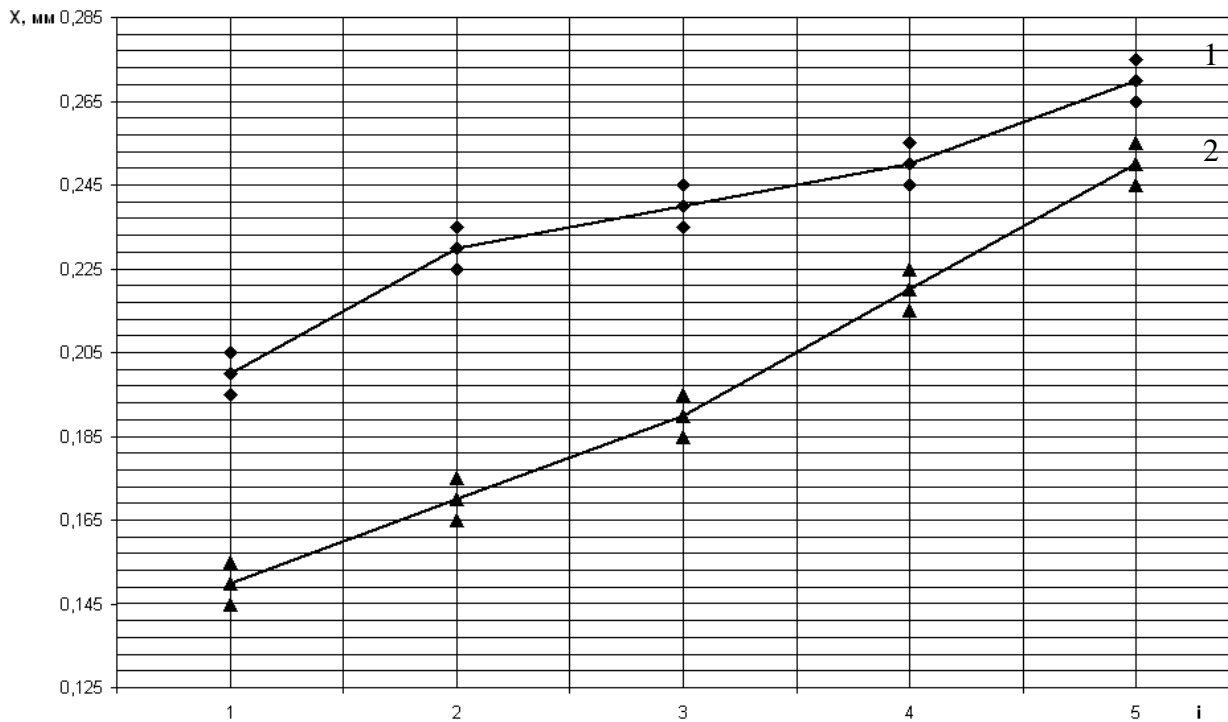


Рисунок 7. Зміна амплітуди вертикальних коливань по висоті форми в залежності від водоцементного відношення: 1 - $\frac{B}{Ц} = 0,45$; 2 - $\frac{B}{Ц} = 0,37$.

Для порівняння результатів теоретичних і експериментальних досліджень вибрано амплітуду коливань в горизонтальній і вертикальній площинах та потужність приводу установки. На рис. 3.16 приведені графіки зміни амплітуд горизонтальних коливань.

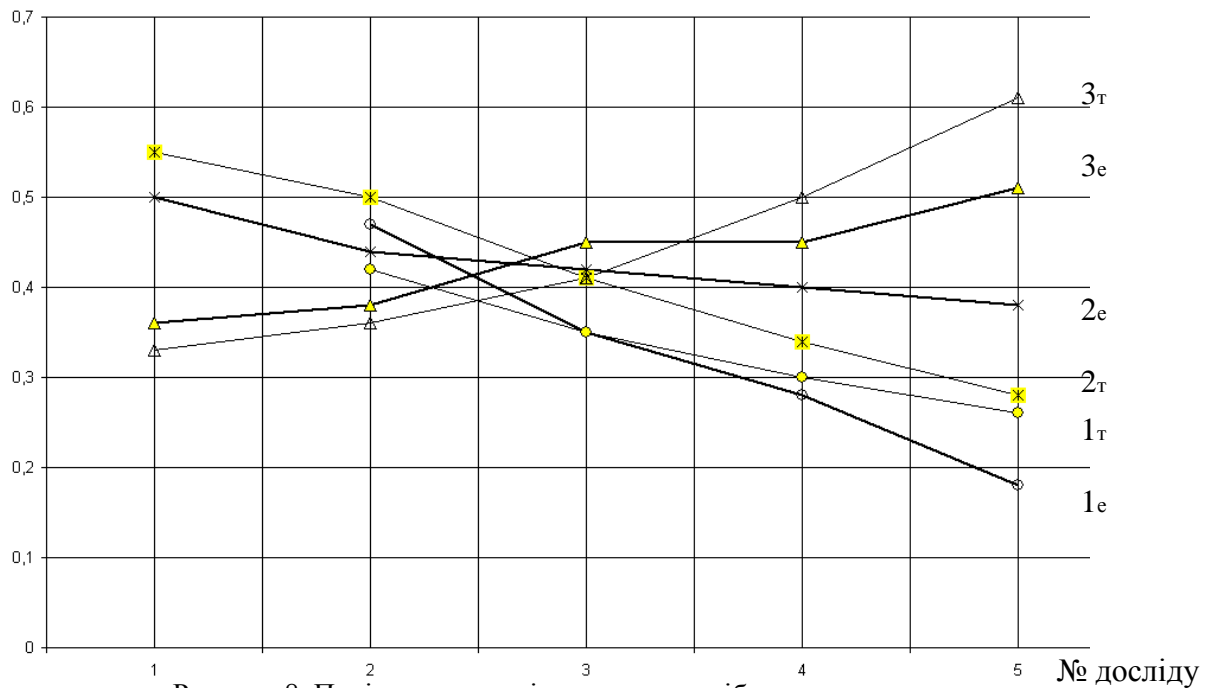


Рисунок 8. Порівняння амплітуд коливань віброустановки:

1_т, 2_т, 3_т – теоретичні криві;

1_е, 2_е, 3_е – експериментальні криві.

Для порівняння результатів експерименту і теоретичних досліджень були вибрані амплітуди горизонтальних коливань на завершальній стадії ущільнення для виконаних трьох серій досліджень. Як слідує із графіків, розбіжність в середньому складає 7...11 %, причому на початковій стадії (дослід 1, 2) ця розбіжність в результатах виміру і розрахунку є найменшою (7...8 %), а на завершальній стадії дещо збільшується до 14...17 %. Очевидно, похибка в розрахунках криється у точності врахування впливу пружно-інерційних властивостей бетонної суміші, тому в інженерній методиці визначення основних параметрів ця обставина враховується де пропонується уточнена формула для визначення масових характеристик.

Висновки.

1. Вибрано і обґрунтовано методики визначення параметрів в експериментальних дослідженнях, які ґрунтуються на сучасних уявленнях щодо фізичної моделі бетонної суміші та існуючих рекомендацій щодо базових характеристик – амплітуди коливань (0,35...0,70 мм) в горизонтальній площині і (0,15...0,20 мм) у вертикальній площині при реалізації частоти коливань $314 \frac{рад}{с}$.

2. Розроблена і створена віброустановка із двома віброзбудниками коливань, вісь дії яких співпадає із віссю форми, яка складається із двох напівформ, що з'єднуються в єдину систему на час формування кільця, а віброзбудники забезпечують необхідний за технологією рух робочого органу.

3. Виявлено, що віброустановка здійснює складний рух у двох площинах, який дає можливість зменшити тиск в контактні суміші із бортами установки на 40...50 % у порівнянні із суворо горизонтальними коливаннями і на 150...250 % у порівнянні із вертикально-направленими коливаннями. Встановлені закономірності зміни амплітуд горизонтальних коливань в залежності від часу ущільнення, змушуючої сили та кута зсуву фаз між положеннями дебалансів. Так, за час ущільнення (60 с) амплітуда коливань на піддоні форми зменшилася від значення 0,41 мм до 0,25 мм, що обумовлено збільшенням інерційних властивостей маси бетонної суміші. По висоті форми, що здійснює коливання із явним ефектом прецесії, амплітуда коливань по висоті форми збільшується. Наприклад, на



піддоні амплітуди коливань 0,41 мм, а на верхній частині форми амплітуда сягає величини 0,58 мм.

4. Отримані експериментально-аналітичним шляхом числові значення тиску в середній частині форми змінюються в невеликих межах (відхилення складає величину 9...11 %) і мають числові значення $1,1...1,4 \frac{H}{\text{см}^2}$. Визначені сили тертя об борта форми, вплив кута зсуву фаз між дебалансами вібраторів та амплітуду коливань на тиск, на енергію установки. Виявлено, що при куті зсуву фаз $\frac{\pi}{2}$ між дебалансами забезпечується найбільш ефективний режим ущільнення.

5. Порівняння результатів експерименту і теорії показали задовільну збіжність амплітуд коливань (розбіжність 8...14 %), а розбіжність за потужністю складає величину 11...20 %, що дає можливість вважати, що передумови та вибрана фізична та математична моделі реально відображають дійсну картину руху віброустановки.

Література

1. Назаренко І.І., Корнійчук Б.В. «Теоретичні дослідження руху віброустановки з вертикальним розташуванням збудників коливань» - «Техніка Будівництва», Київ, КНУБА, №22.
2. Гусев Б.В., Деминов А.Д., Крюков Б.И. и др.. Ударно-вибрационная технология уплотнения бетонных смесей. –М.: Стройиздат, 1982, -152 с.
3. Карамзин В.Е., Синева Е.А. Взаимодействие бетонной смеси с формой при вибрационном уплотнении // Новые представления о работе поддонов формы. –М.: НИИЖБ, ВУМ –Прага, 1972, с. 80-92.
4. Шмыгальский В.Н. Виброуплотнение бетонных смесей. –В кн.: Технологическая механика бетона. –Рига, РПИ, 1985, с. 115-127.
5. Олехнович К.А. Рациональное техническое переоснащение формовочных постов предприятий сборного железобетона. // Строительные материалы и конструкции. 1990, №4. с. 12-13.
6. Орисенко О.В., Нестеренко М.П. Розроблення установки для формування залізобетонних кілець із просторовим коливанням робочого органа. // Галузеве машинобудування, будівництво. Зб. пр. –Полтава: ПДТУ ім. Юрія Кондратюка, 2000, с. 38-46.
7. Назаренко И.И. Прикладные задачи теории вибрационных систем. –К.: ИСИО, 1993, -216 с.
8. Осмаков С.А., Брауде Ф.Г. Виброударные формовочные машины. –Л.: Стройиздат, 1976, -128 с.
9. Сивко В.И. Основы механики вибрируемой бетонной смеси. К.: Высш. шк., 1987, -168 с.
10. Файтельсон Л.А., Бриедис И.П. Определение коэффициента затухания в бетонной смеси. // Исследование по бетону и железобетону. –Рига, вып. 8.
11. Десов А.Е. О рациональных режимах вибрирования бетонных смесей // Труды НИИЖБ. –М.: Стройиздат, 1959, вып. 11. с. 9-17.
12. Назаренко І.І. Прикладні задачі теорії вібраційних систем (2-ге видання). –К.: Видавничий дім «Слово», 2010, -440 с.
13. Назаренко І.І., Баранов Ю.О., Корнійчук Б.В. Корчагін М.М. Установка для формування трубчастих виробів з бетонних сумішей. Патент на корисну модель. UA 25881 U, Бюл. №13, 2007.