DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56(1).105-111

УДК 693.54

Володимир БАСАРАБ,
канд. техн. наук, доцент
ORCID: 0000-0003-2888-7398
Ірина УМАНЕЦЬ,
канд. техн. наук, доцент
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ УЩІЛЬНЕННЯ БЕТОННОЇ СУМІШІ В УМОВАХ ЗВЕДЕННЯ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

Стаття присвячена дослідженню технологічних параметрів процесу ущільнення бетонної суміші в умовах зведення будівель і споруд. Підкреслено актуальність раціонального підбору обладнання для ущільнення бетонних сумішей з урахуванням найбільш оптимальних технологічних параметрів процесу ущільнення виходячи з конкретних умов зведення будівель. Проведено огляд основних технологічних параметрів процесу вібраційного ущільнення бетонної суміші. Обґрунтовано доцільність дослідження та розробки раціональних параметрів вібраційного устаткування, враховуючи геометричні параметри опалубки, властивості бетонної суміші та амплітудно-частотний режим процесу вібраційного ущільнення. Розглянуто комплексний технологічний процес зведення монолітних бетонних і залізобетонних конструкцій та описано фізичну модель вібраційного ущільнення бетонної суміші.

Описано технологію ущільнення бетонної суміші при використанні глибинних вібраторів, поверхневих віброплит, навісних вібраторів, наведено раціональні параметри їхнього застосування. Наведено основні технологічні параметри процесу віброущільнення: геометричні розміри залізобетонної конструкції, що зводиться (висота H, товщина B); конструктивні особливості опалубки (геометрія, жорсткість); властивості бетонної суміші (густина, жорсткість, в'язкість, вібров'язкість); розташування арматури та густина армування; параметри віброущільнюючого устаткування (амплітуда X та частота ω коливань робочого органу, потужність, геометрія робочого органу, амплітудно-частотний спектр передачі вібраційної енергії).

Наведено результати експериментальних досліджень розповсюдження хвиль напружень та кута зсуву фаз при висоті шару бетону 1 м. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що характер процесів протягом циклу ущільнення відрізняється кількісно і якісно – в міру ущільнення відбувається зміна напружено-деформованого стану в товщі суміші, також змінюється спектр вібраційних коливань. Запропоновано раціональні параметри та режими віброущільнення виходячи з умов отримання високої якості монолітних конструкцій та мінімальних енерговитрат на одиницю продукції.

Ключові слова: технологічні параметри, вібраційне ущільнення бетонної суміші, зведення будівель і споруд.

Вступ. Бетон та залізобетон належать до основних матеріалів, які використовують у сучасному будівельному виробництві. Широке використання

бетону та залізобетону зумовлено високими фізико-механічними показниками, довговічністю, можливістю зведення різноманітних будівельних конструкцій порівняно простими технологічними методами, використанням в основному місцевих будівельних матеріалів, порівняно незначною вартістю.

Сьогодні найбільш перспективною технологією зведення будівель і споруд є монолітне будівництво. Воно передбачає зведення конструктивних елементів з бетонної суміші із використанням спеціальних форм (опалубки) безпосередньо на будівельному майданчику. Бетонна суміш представляє собою багатокомпонентне середовище фізико-механічні характеристики якого залежать від складових компонентів а також від обраної технології укладання, ущільнення та догляду за бетоном [1, 3, 4].

Актуальність. В умовах зведення будівель і споруд використовуються традиційні монолітно-каркасні технології з використанням важких будівельних сумішей. Процес ущільнення бетонних сумішей є одним з провідних процесів в технології зведення будівель і споруд і має вирішальний вплив на якість виробів, трудоємність робіт та технологічну ефективність.

Традиційні засоби вібраційного ущільнення бетонної суміші мають ряд технологічних параметрів, що визначають ступінь та характер впливу на оброблюване середовище (бетонну суміш), серед яких основними є амплітуда та частота робочого органу вібромашини, товщина шару бетонної суміші, довжина робочої частини вібромашини (поверхневої чи глибинної), радіус дії вібратора, час вібрування та ін. Окрім того, на сьогоднішній день з'явились нові технології ущільнення, що потребують реалізації складних режимів руху робочого органу за умов отримання виробів високої якості та мінімальних енерговитрат (різночастотні, полічастотні, програмно-керовані). Задача раціонального підбору обладнання для ущільнення бетонних сумішей з урахуванням найбільш оптимальних технологічних параметрів процесу ущільнення виходячи з конкретних умов зведення є актуальною.

Постановка проблеми. Процес зведення будівель та споруд представляє собою складний комплекс проєктних, будівельних, монтажних та інших рішень, що виконуються в певній технологічній послідовності [2, 5, 6, 7, 8]. Зведення сучасних будівель та споруд повинні забезпечувати не лише міцність, стійкість, надійність, економічність, безпеку але й оптимальне їх поєднання за критеріями витрат праці, часу, ресурсів, вибору найкращих технологічних рішень для максимального задоволення потреб суспільства. Оскільки в процесі зведення будівель за монолітно-каркасною технологією варіаційними технологічними параметрами є матеріал (компоненти бетонної суміші, добавки, пластифікатори та ін.), а також технологія приготування бетонної суміші, доставки на буд майданчик, тип опалубної системи, технологія укладання, ущільнення, догляду за бетоном, тому актуальною залишається задача дослідження технологічних параметрів ущільнення бетонної суміші а також вибір оптимальних параметрів та обладнання для укладання та ущільнення бетону в умовах зведення.

Мета дослідження: аналіз технологічних параметрів процесу ущільнення бетонної суміші та розробка оптимальних методів та режимів їх застосування в умовах зведення будівель та споруд.

Основний матеріал. Комплексний процес зведення монолітних бетонних і залізобетонних конструкцій складається із влаштування опалубки, армування конструкцій, бетонування, вистоювання бетону в забетонованих конструкціях,

розпалублення, натягування напружуваної арматури та влаштування її захисту чи ін'єкції каналів (при зведенні попередньо напружених залізобетонних конструкцій), а у разі потреби опоряджування поверхонь конструкцій. Процес бетонування, що складається з укладання й ущільнення бетонної суміші, в багатьох випадках є ведучим, з яким погоджують виконання інших процесів.

Бетонна суміш представляє собою багатокомпонентне середовище в якому всі складові (крупний та дрібний заповнювач, цемент, вода, добавки) рівномірно розподілені по всьому об'єму (за умов якісного перемішування). Частинки крупного заповнювача оточені в'язко-пластичним шаром цементно-піщаної суміші. Також поміж частинками є порожнечі заповнені повітрям. Забезпечення міцності і довговічності бетону досягається збільшенням його щільності і однорідності після укладання за рахунок ущільнення. Окрім того, ущільнення бетону забезпечує рівномірне заповнення об'єму опалубки та якісне з'єднання з арматурним каркасом бетонованої конструкції.

В основному бетонну суміш ущільнюють вібруванням. Вібрування бетонної суміші полягає у поширенні в ній механічних коливань у вигляді хвиль, що створюють динамічний тиск. Фізична сутність процесу віброущільнення наступна: вібраційна машина взаємодіючи з бетонною сумішшю передає їй енергію, внаслідок чого в суміші відбувається зміна напружено-деформованого стану. Періодична зміна складного спектру напружено-деформованого стану спричиняє тиксотропне розрідження суміші, переупаковку компонентів та витіснення повітря і води, чим і досягається ефект ущільнення. Іншими словами, внаслідок тиксотропного розрідження в умовах дії вібрації бетонна суміш набуває властивостей ″важкої рідини″, компоненти суміші при цьому перекомпоновуючись та долаючи сили в'язкого опору, щільно притискаються один до одного.

Вібруванням ущільнюють бетонну суміш рухливістю 0…9 см. Якщо рухливість суміші більша, енергія коливань викликає значне осідання крупних заповнювачів, що призводить до її розшарування, і, як наслідок, до зменшення міцності. Тривалість вібрування становить 30…100 с. За цей час (залежно від умов вібрації) завершується час осідання бетонної суміші і на поверхню бетону витискаються цементне молоко і бульбашки повітря, що свідчить про необхідність закінчення дії вібрації. Подальше вібрування може призвести до розшарування суміші внаслідок осідання крупних частинок.

Після завершення дії вібрації властивості бетонної суміші значно змінюються. Вона отримує певну структуру, що має деяку міцність (наприклад, робітник може переміщуватись по поверхні бетону, не порушуючи його структури). Міра ущільнення бетонної суміші має відповідати узгодженості її складу та рухливості, параметрам коливань – амплітуді, частоті, напрямку та тривалості дії. В деяких випадках застосування змінних або комбінованих режимів ущільнення бетонної суміші є більш раціональним, оскільки дозволяє досягти вищої якості ущільнення бетону конструкцій при менших витратах енергії та часу.

Частота коливань вібраторів, що використовуються в будівництві, становить від 2800 до 20000 хв$^{-1}$. Амплітуда коливань взаємозв'язана з частотою і становить для різних вібраторів від 3 до 0,1 мм. Вібратори з частотою до 3500 хв$^{-1}$ і амплітудою до 3 мм відносять до низькочастотних; їх використовують для ущільнення крупнозернистих бетонних сумішей. Середньочастотні і високочастотні вібратори створюють відповідно коливання 3500…9000 хв$^{-1}$ з амплітудою 1,5…1,0 мм і частотою 10000…20000 хв$^{-1}$ з амплітудою 1,0…0,1 мм. Високочастотне вібрування

потребує меншої потужності вібраторів і скорочує тривалість ущільнення дрібнозернистих бетонних сумішей. Для підвищення ефективності ущільнення бетонної суміші із зернами різної величини застосовують полічастотні вібратори з коливаннями низької (до 3600 $хв^{-1}$) і високої (20000 $хв^{-1}$) частот. За напрямком коливань вібратори бувають з вертикальними, горизонтальними та просторовими коливаннями. Використання тієї чи іншої конструкції вібратора обумовлюється бетонною конструкцією та технологічними чинниками. При значних масивах бетону доцільно використовувати горизонтально направлені коливання або комбінацію різнонаправлених вібраторів.

Залежно від способу дії на ущільнювану бетонну суміш використовують наступні типи вібраторів: *глибинні,* що передають коливання на бетонну суміш від заглибленого в неї вібронаконечника чи корпуса; *поверхневі,* які передають коливання через робочу площадку, встановлену на поверхні бетонної суміші; *зовнішні,* що закріплені на зовнішньому блоці опалубки і передають коливання на бетонну суміш через опалубку.

Глибинні вібратори з улаштованим в робочий корпус віброзбуджувачем – вібробулави – мають діаметр 75, 100, 114, 133 мм і довжину від 420 до 500 мм; частота коливань – від 5300 до 12000 $хв^{-1}$; їх застосовують при ущільненні бетонної суміші в мало- і середньоармованих масивних конструкціях (відстань між стрижнями арматури відповідно більше ніж 300 мм і від 100 до 300 мм). Вібратори з гнучким валом оснащують вібронаконечниками діаметром 28, 38, 51 та 76 мм, довжиною від 360 до 440 мм; частота коливань – 10000...20000 $хв^{-1}$.

Від положення вібронаконечника в шарі бетонної суміші істотно залежить ефективність процесу ущільнення. Наконечник глибинного вібратора частково (на 5…10 см) заглиблюють вертикально чи під кутом у раніше укладений і ще не затверділий шар бетону. Для якісного ущільнення в місці стику свіжеукладеного шару бетонної суміші з раніше укладеним та підвищення продуктивності ручного ущільнення глибинний вібратор слід заглиблювати під кутом 30…35^0 до горизонту. Після ущільнення бетонної суміші на одній позиції вібратор переміщують на наступну. Відстань між позиціями заглиблення вібратора не повинна перевищувати 1,5 радіуса його дії.

На рис.1 наведено основні схеми віброущільнення бетону. Фізична модель віброущільнення представляє собою взаємодію вібраційного обладнання (глибинний вібратор, навісний вібратор, віброплатформа, віброрейка) з масивом бетонної суміші, що укладено в опалубку або на поверхню основи, що є контактною задачею взаємодії двох систем.

Основними технологічними параметрами, що впливають на процес віброущільнення є: геометричні розміри залізобетонної конструкції, що зводиться (висота H, товщина B); конструктивні особливості опалубки (геометрія, жорсткість); властивості бетонної суміші (густина, жорсткість, в'язкість, вібров'язкість); розташування арматури та густина армування; параметри віброущільнюючого устаткування (амплітуда X та частота ω коливань робочого органу, потужність, геометрія робочого органу, амплітудно-частотний спектр передачі вібраційної енергії).

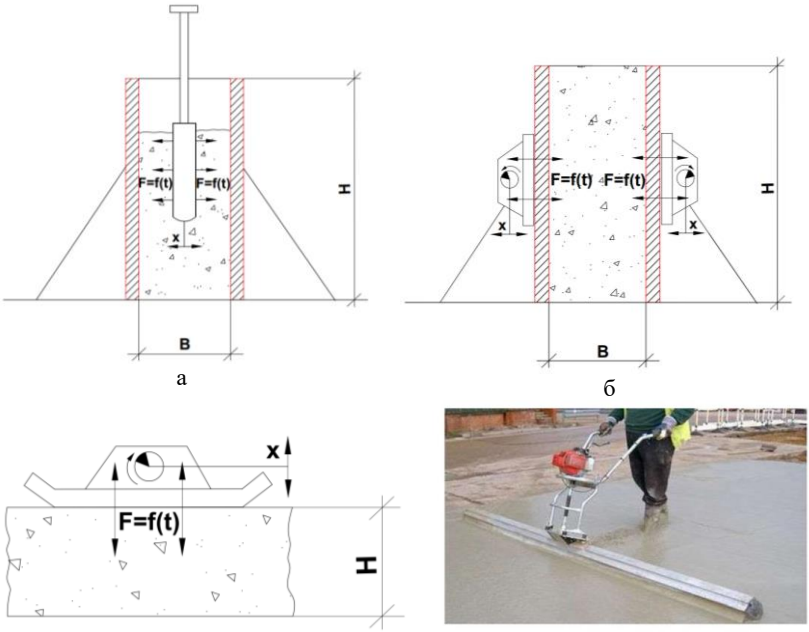

Рис. 1. Схеми основних типів віброущільнення бетону:
а – ущільнення глибинними вібраторами; б – використання навісних вібраторів;
в – використання поверхневої віброплощадки; г – поверхневе ущільнення за допомогою віброрейки

На рис. 2 наведено результати експериментальних досліджень розповсюдження хвиль напружень та кута зсуву фаз при висоті шару бетону 1 м [1]. На графіках видно, що характер процесів протягом циклу ущільнення відрізняється кількісно і якісно – в міру ущільнення відбувається зміна напружено-деформованого стану в товщі суміші, також змінюється спектр вібраційних коливань. Згідно рекомендацій по технології виконання монолітних робіт амплітуда вібраційного впливу на бетонну суміш варіюється в межах від 0,1 до 3 мм, частота від 25 до 150 Гц.

Враховуючи властивості бетонної суміші та результати досліджень рекомендується на початку ущільнення задіювати низькочастотний режим при високій амплітуді коливань (X=3 мм, f= 25 Гц), далі по мірі ущільнення необхідно знижувати амплітуду коливань до 0,1 мм і збільшувати частоту до 150 Гц (деякі дослідники рекомендують кінцеву частоту 600 Гц), це дає змогу забезпечити максимальну якість ущільнення бетону а також дозволить уникнути розшарування компонентів бетонної суміші. Досягти різночастотного режиму віброущільнення можливо за рахунок системи керування електроприводом вібраційного обладнання, шляхом використання вібромашин, що одночасно можуть працювати на різних частотах (полічастотний режим), також шляхом комбінації декількох режимів ущільнення. Також призначаючи режим ущільнення необхідно враховувати

геометричні особливості опалубки, оскільки при достатньо невеликих товщинах бетону і, особливо у вертикальних конструкціях може виникнути ″пристінний″ ефект (вплив коливання стінок опалубки на процес ущільнення).

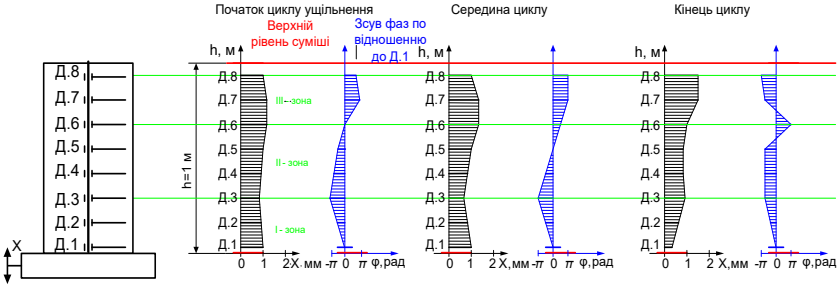

Рис. 2. Дослідження переміщення шарів суміші та кута зсуву фаз

Висновки.

1. Проведено аналіз існуючих методів вібраційного ущільнення з метою дослідження технологічних параметрів процесу ущільнення бетонної суміші в умовах зведення будівель і споруд.
2. Розглянуто комплексний технологічний процес зведення монолітних бетонних і залізобетонних конструкцій та описано фізичну модель вібраційного ущільнення бетонної суміші.
3. Проведено огляд основних технологічних параметрів процесу вібраційного ущільнення бетону.
4. Здійснено дослідження технологічних параметрів процесу ущільнення бетонної суміші, запропоновано раціональні параметри та режими віброущільнення виходячи з умов отримання високої якості монолітних конструкцій та мінімальних енерговитрат на одиницю продукції.

Список літератури:

1. Басараб В.А. Дослідження полічастотного режиму коливань робочого органу електромагнітної ударно-вібраційної установки. *Управління розвитком складних систем*. 2018. № 34. С. 182 - 187.

2. Терновий В.І., Уманець І.М.. BIM у технології будівельних процесів. *Будівельне виробництво*. 2019. № 67. С. 37-40.

3. Басараб В.А., Уманець І.М., Саушева Л.С. Методика вибору комплекту засобів ущільнення ґрунту пазух котлованів і траншей за технічною ознакою. *Основи та фундаменти*. 2021. Вип. 43. С. 67-78.

4. Махиня О.М., Галенко Є.О. Теоретичні дослідження монтажної ваги армовидавлювальних конструкцій. *Основи та фундаменти*. 2024. № 49. С. 77–85.

5. Молодід О.О., Тонкачеєв Г.М., Молодід О.С. Методика впровадження у будівництво нових конструктивно-технологічних рішень з відновлення будівельних конструкцій. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2018. № 37. С. 163-171.

6. Осипов А.Ф. Основные принципы проектирования динамически трансформирующихся технологических систем. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. 2000. Вип. 67. С. 162 - 165.

7. Tonkacheiev H.M., Molodid O.S., Galinskyi O.M., Plokhuta R.O., Rudnieva I.M., Priadko I.M. The technology of crack repair by polymer composition. *Опір матеріалів і теорія споруд*. 2022. Вип. 108. С. 203-216. https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.108.203-216

8. Honcharenko T., Shpakova H., Predun K., Zinchenko M., Liashchenko M. Smart Information System for Creating Digital Twins of Construction Project. *IEEE 2022 International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST),* 28-30.04.2022. DOI: 10.1109/SIST54437.2022.9945785

Volodymyr BASARAB, Iryna UMANETS

Research of technological parameters of the concrete mixture compaction process in the conditions of construction of buildings and structures

The article is devoted to the study of technological parameters of the process of compaction of concrete mix in the conditions of construction of buildings and structures. The relevance of rational selection of equipment for compaction of concrete mixtures, taking into account the most optimal technological parameters of the compaction process based on the specific conditions of building construction, was emphasized. A review of the main technological parameters of the process of vibratory compaction of concrete mix was conducted. The feasibility of researching and developing rational parameters of vibration equipment, taking into account the geometric parameters of the formwork, the properties of the concrete mix, and the amplitude-frequency regime of the vibration compaction process, was substantiated. The complex technological process of erecting monolithic concrete and reinforced concrete structures was considered and the physical model of vibration compaction of the concrete mix was described.

The technology of compacting concrete mix using deep vibrators, surface vibrating plates, and mounted vibrators was described, and rational parameters for their application were given. The main technological parameters of the vibrocompaction process were given: geometric dimensions of the reinforced concrete structure being erected (height H, thickness B); structural features of the formwork (geometry, stiffness); properties of the concrete mix (density, stiffness, viscosity, vibroviscosity); location of the reinforcement and density of the reinforcement; parameters of the vibrocompaction equipment (amplitude X and frequency ω of the vibrations of the working body, power, geometry of the working body, amplitude-frequency spectrum of vibration energy transmission).

The results of experimental studies of the propagation of stress waves and the phase shift angle at a concrete layer height of 1 m were presented. According to the results of experimental studies, it was established that the nature of the processes during the compaction cycle differs quantitatively and qualitatively - as compaction progresses, the stress-strain state in the mixture changes, and the spectrum of vibration oscillations also changes. Rational parameters and modes of vibration compaction were proposed based on the conditions for obtaining high quality monolithic structures and minimal energy consumption per unit of production.

Keywords: technological parameters, vibration compaction of concrete mix, construction of buildings and structures.