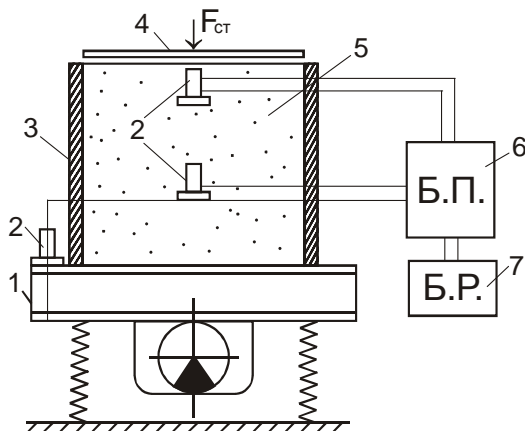


Г. С. Ратушняк

Н. М. Слободян

# ВІБРОСИЛОВА ТЕХНОЛОГІЯ ФОРМУВАННЯ ДЕКОРАТИВНИХ БЕТОННИХ ВИРОБІВ



Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**Г. С. Ратушняк**

**Н. М. Слободян**

**ВІБРОСИЛОВА ТЕХНОЛОГІЯ ФОРМУВАННЯ  
ДЕКОРАТИВНИХ БЕТОННИХ ВИРОБІВ**

**Монографія**

УНІВЕРСУМ-Вінниця

2007

Рецензенти:

*І. Н. Дудар, доктор технічних наук, професор*

*І. І. Назаренко, доктор технічних наук, професор*

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 4 від 28.12.2006 р.).

**Ратушняк Г. С., Слободян Н. М.**

Р 25 Вібросилова технологія формування декоративних бетонних виробів. Монографія – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – 161с.

ISBN 978-966-641-221-1

В монографії розглядається технологія формування стінових дрібноштучних бетонних виробів з використанням адаптивного привантаження. Пропонується фізико-математична модель ущільнювальної бетонної суміші. Розраховані основні динамічні параметри, а також залежність від умов формування суміші, висоти виробу, ступеня ущільнення матеріалу. Досліджується зв'язок між динамічним тиском й жорсткістю матеріалу суміші, вплив яких визначає напружений стан бетонної суміші. Досліджена математична модель гнучкого еластичного адаптивного привантаження системи. Рекомендуються робочі параметри технології виготовлення бетонних виробів.

**УДК 666.97.033**

**ISBN 978-966-641-221-1**

## З М І С Т

<b>ВСТУП</b> .....	<b>6</b>
<b>1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ УЩІЛЬНЕННЯ БЕТОННОЇ СУМІШІ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ СТІНОВИХ ВИРОБІВ</b> .....	<b>8</b>
1.1. Оцінювання технологічних параметрів та властивостей бетонних сумішей при їх ущільненні .....	8
1.2. Способи ущільнення бетонних сумішей .....	14
1.2.1. Механічне трамбування .....	15
1.2.2. Вібрування .....	16
1.2.3. Ущільнення бетонної суміші методом центрифугування .....	20
1.2.4. Віброцентрифугування бетонної суміш .....	21
1.2.5. Вібровакуумування .....	21
1.2.6. Вібропресування бетонної суміші .....	22
1.3. Особливості віброущільнення бетонної суміші з використанням привантаження .....	22
<b>2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ УЩІЛЬНЕННЯ БЕТОННОЇ СУМІШІ ПРИ ФОРМУВАННІ ДЕКОРАТИВНИХ СТІНОВИХ ДРІБНОШТУЧНИХ ВИРОБІВ</b> .....	<b>24</b>
2.1. Передумови та припущення для формування фізичної та математичної моделі ущільнення бетонної суміші ...	24
2.2. Фізичні та математичні моделі ущільнення бетонної суміші із застосуванням адаптивного привантаження ...	26
2.3. Визначення основних параметрів процесу застосування рівняння руху .....	30
2.4. Виявлення характеристик та параметрів, що суттєво впливають на режим роботи установки .....	32
2.5. Розробка математичної моделі гнучкого еластичного адаптивного привантаження .....	33
<b>3. ЧИСЛОВО-АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ РУХУ ФОРМУВАННЯ БЕТОННОГО ВИРОБУ</b> .....	<b>43</b>
3.1. Математична модель у вигляді мембранної аналогії Прандтля. Оцінювання прогину поверхні адаптивного привантаження .....	43
3.2. Математична модель тонкої пластини для розрахунків прогинів еластичного привантаження під час формування декоративних стінових бетонних виробів .....	51

3.3. Математична модель у вигляді мембрани на пружній основі та визначення її прогинів . . . . .	56
3.4. Математична модель процесу формування декоративного стінового бетонного виробу на основі варіаційних принципів . . . . .	62
3.5. Визначення об'єму витісненої з форми бетонної суміші. . . . .	67
3.6. Порівняльний аналіз математичних моделей розрахунків прогинів еластичного привантаження під час формування декоративних стінових бетонних виробів: моделі гнучких пластин та мембран . . . . .	72
3.6.1 Модель мембрани . . . . .	73
3.6.2 Модель гнучкої пластини . . . . .	74
3.6.3 Модель затиснутої вздовж контуру гнучкої пластини . . . . .	76
3.7 Критерії необхідності врахування взаємодії коливної системи та джерела енергії у процесі вібраційного формування декоративних стінових бетонних виробів . . . . .	79
3.8 Визначення раціонального часу ущільнення бетонної суміші . . . . .	81
3.9 Критерії оцінювання ефективності ущільнення бетонної суміші на основі теорії подібності . . . . .	93
<b>4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМУВАННЯ ТА УЩІЛЬНЕННЯ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ І ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ СТІНОВИХ ДРІБНОШТУЧНИХ БЕТОННИХ ВИРОБІВ . . . . .</b>	<b>106</b>
4.1. Постановка задач досліджень та методика їх проведення . . . . .	106
4.2. Характеристика матеріалів бетонних сумішей для виготовлення декоративних стінових виробів . . . . .	109
4.3. Оцінювання технологічних параметрів ущільнення бетонної суміші . . . . .	114
4.4. Експериментальні дослідження параметрів еластичного привантаження . . . . .	116
4.5. Визначення раціональної величини привантаження . . . . .	120
4.6. Експериментальне визначення процесу ущільнення суміші . . . . .	138
4.7. Порівняння теоретичних та експериментальних значень технологічних параметрів робочого процесу ущільнення бетонної суміші . . . . .	142

5. ДОСЛІДНО-ПРОМИСЛОВЕ ВПРОВАДЖЕННЯ ФОРМУ- ВАННЯ ТА УЩІЛЬНЕННЯ ДЕКОРАТИВНИХ СТІНОВИХ ДРІБНОШТУЧНИХ БЕТОННИХ ВИРОБІВ .....	143
5.1. Апробація можливості застосування у виробничих умовах формування й ущільнення декоративних стіно- вих дрібноштучних бетонних виробів. ....	143
5.2. Розрахунок економічної ефективності вдосконалення тех- нології ущільнення бетонної суміші адаптивним привантаженням .....	146
ВИСНОВКИ .....	150
ЛІТЕРАТУРА .....	152

## ВСТУП

У сучасному будівництві України поряд із традиційним спорудженням висотних житлових будинків великого поширення набуває індивідуальне будівництво малоповерхових будинків, котеджів і т.д. За технологією й архітектурним оздобленням малоповерхове будівництво відрізняється специфічними особливостями, серед яких найважливішими є переважне використання малих за розміром стінових виробів з різноманітною декоративною обробкою. У будівництві використовується значна кількість декоративних стінових дрібноштучних виробів, виготовлених з нових матеріалів і за новими технологіями, що мають найрізноманітніші геометричні параметри. Енергозберігаючим технологічним процесам, які відбуваються під час надання форми й ущільнення бетону та науковому обґрунтуванню вибору його складу, приділяється недостатньо уваги. А саме вирішення цих проблем дозволяє підвищити ефективність формування таких будівельних виробів із заданими якісними характеристиками та знизити енергоємність їх виготовлення на будівельному майданчику.

Існуючі рекомендації по визначенню складу сумішей й технологічні параметри їх обробки відпрацьовані тільки для типових бетонних і залізобетонних виробів в умовах заводів будівельної індустрії. Одночасно такі рекомендації практично відсутні для виробництва дрібноштучних бетонних виробів. Досліджень на цю тему мало й вони мають несистемний характер. Впровадження закордонного досвіду в цій галузі обмежене через прив'язку до використовуваного ними конкретного устаткування й застосування різних складних компонентів.

Тому проблема системного дослідження ущільнення бетонної суміші та підбору її складу та технології формування декоративних стінових дрібноштучних виробів в умовах будівельного майданчика, як наслідок отримання необхідних якісних параметрів, є актуальною.

Робота присвячена удосконаленню технологічного процесу ущільнення бетонної суміші при формуванні декоративних стінових дрібноштучних виробів із заданими геометричними параметрами та якістю поверхонь з використанням еластичного адаптивного привантаження.

В цьому напрямку авторами проведені теоретичні та прикладні дослідження з метою:

– обґрунтувати можливість виготовлення декоративних дрібноштучних виробів із заданими геометричними характеристиками та визначеним складом при застосуванні еластичного адаптивного привантаження в процесі формування та ущільнення бетонної суміші;

– встановлення закономірностей процесу формування декоративних бетонних виробів за рахунок використання адаптивного привантаження в запропонованій технології ущільнення бетонних сумішей та раціональному вибору їх складу;

– розроблення математичних моделей робочих процесів виготовлення бетонних виробів і установа оптимальних енергозберігаючих технологічних параметрів частоти і амплітуди коливань вібраційного пристрою та часу при різних режимах ущільнення, при яких досягнута максимальна щільність суміші з мінімальними витратами енергії;

– експериментального підтвердження оптимальних енергозберігаючих технологічних режимів та параметрів ущільнення бетонної суміші: амплітуда, потужність, динамічний тиск на адаптивне привантаження при формуванні декоративних стінових дрібноштучних виробів з заданими геометричними параметрами та якісною поверхнею.

Для практичного використання в будівельному виробництві запропоновано методики для підбору та розрахунку складу бетонних сумішей та забезпечення енергозберігаючої технології формування й ущільнення бетонних сумішей декоративних стінових дрібноштучних виробів з застосуванням адаптивного еластичного привантаження з широкою номенклатурою їх конструктивних особливостей.



# 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ УЩІЛЬНЕННЯ БЕТОННОЇ СУМІШІ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ СТІНОВИХ ВИРОБІВ

## 1.1. Оцінювання технологічних параметрів та властивостей бетонних сумішей при їх ущільненні

Дрібнорозмірні вироби використовуються у будівництві з початку ХХ сторіччя. Так, ще у 1906 році у Петербурзі була прийнята постановова про спорудження будівель із бетонних каменів.

За роки незалежності України значно розширилося індивідуальне будівництво малоповерхових будинків, котеджів і т.п. Зросла нагальна потреба у розробці технологічних основ та створенні відповідного обладнання для випуску дрібнорозмірних бетонних виробів з широкою номенклатурою конструктивних особливостей, набір яких дозволяє збирати будинок за відповідною технологією з використанням того чи іншого архітектурного оздоблення.

За технологією малоповерхове будівництво відрізняється специфічними особливостями, серед яких найважливішими є малооб'ємні та розосереджені роботи, віддаленість об'єктів від баз будівельної індустрії [1].

При виробництві різних бетонних і залізобетонних елементів, конструкцій і виробів застосовуються методи ущільнення, котрі за швидкістю прикладання сили розділяються на статичні та динамічні [2-14]. Найбільш розповсюдженим є динамічний метод, який характеризується такими параметрами, як амплітуда  $A$  і частота коливань  $\omega$ . Цей спосіб внаслідок інтенсивної дії на суміш, що ущільнюється, отримав загальну назву вібраційного [5-6]. Цілком очевидно, що параметри вібраційного процесу – амплітуда, частота та їх функції – швидкість  $A_0\omega$  і прискорення  $A_0\omega^2$ , а також час ущільнення  $t$  є основними характеристиками процесу. Тому, з самого початку виникнення і застосування вібрації [11-14, 54-66] і до цього часу [62] точиться дискусія щодо вибору тих чи інших значень як параметрів, так і їх складових, а також впливу їх на процес ущільнення.

Щоби повніше розкрити механізм цього впливу, необхідно розглянути і оцінити фізику процесу ущільнення бетонної суміші, що включає характер зміни властивостей суміші під дією вібрації та його вплив на досягнення максимальної щільності. Щодо вибору параметрів вібрації, то традиційно із початку застосування вібротехнологій було запропоновано як вихідні параметри використовувати такі числові значення: амплітуда коливань  $A_0 = 0,35...0,5$  мм і кругова частота коливань  $\omega = 300...314$  с<sup>-1</sup> [11-13, 66]. Ці значення, що пізніше були названі стандартними [8, 11, 49], і є найбільш вживаними у техно-

логії вібрування бетону [13, 22-25]. Якщо оцінювати поведінку бетонної суміші, то існує декілька поглядів на цей процес. Перш за все, бетонна суміш є багатокомпонентним середовищем, яке складається із старанно підібраних за складом крупного та дрібного заповнювачів, цементу і води [3, 4, 25, 28].

Задача ущільнення полягає у досягненні максимальної щільності приготовленої суміші за рахунок компактного розташування заповнювачів, якісного їх склеювання цементним клеєм, витіснення повітря, що на початку ущільнення складає значну величину (до 40%), а також витіснення надлишкової води, що не вступила в хімічну реакцію з цементом [2-4, 17-20, 29, 30, 41]. Виходячи з цього, процес ущільнення є надто складним та таким, що не піддається точному аналітичному опису. Тому існує безліч тлумачень щодо фізичного та математичного моделювання цього процесу [11-4, 33-35, 49-52].

У фізиці процесу одним із найважливіших аспектів є уявлення про внутрішнє тертя між твердими компонентами, тобто між зернами заповнювачів. Цей вид тертя прийнято умовно називати “сухим” тертям, тому зміна коефіцієнта внутрішнього тертя, його аргументація є результатом досліджень багатьох авторів [12, 13, 34, 35]. Так, вважається [37], що його природа є результатом сухого тертя і його величина знаходиться у межах 0,25...0,5, в той час як в інших джерелах [38] знаходимо, що цей коефіцієнт має величину 0,78...0,82. Така розбіжність є фактором відсутності єдиного погляду на процес і, очевидно, що причина лежить у площині застосування різних за складом та жорсткістю сумішей і отримання цих коефіцієнтів різними методиками. Зазначені коефіцієнти отримували шляхом зсуву шарів суміші і тому можливо, що такий параметр, як швидкість зсуву відіграє ту чи іншу роль у визначенні коефіцієнта тертя. У роботі [54] знаходимо, що у загальній оцінці тертя враховують так звані внутрішнє та зовнішнє тертя, які до того ж змінюються у процесі вібрації. Очевидно, процес ущільнення полягає у зменшенні сил, що визначають тертя між частинками, і ті, у свою чергу, отримавши певні ступені свободи руху, мають можливість рухатися й займати звільнене від повітря місце. Таким чином, здійснюється перегрупування частинок суміші у більш компактну структуру, відстань між ними зменшується, а сама суміш ущільнюється. Ми приходимо до висновку, що для ефективного ущільнення необхідний рух частинок, який може бути результатом статичного тиску або динамічної дії. Тепер виникає питання у визначенні самого механізму ущільнення, що є передумовою вибору математичної моделі процесу.

Одним з найперших, хто намагався пояснити цей механізм, був Р. Лерміт, котрий зазначав, що механізм ущільнення подібний до руху

частинок газу. Наявність відносного руху частинок та взаємний перетин їх траєкторій створюють можливість обміну імпульсами, статична рівнодійна яких перешкоджає зовнішньому тиску, власній вазі і силам зчеплення частинок між собою.

Якщо коротко оцінити підходи до визначення механізму ущільнення, то можна зазначити, що існує два відмінних принципових погляди:

- 1) механізм ущільнення частинок, що являє собою окрему взаємодію між ними [37];
- 2) механізм ущільнення бетонної суміші як процес деформації шарів суміші [43, 105-107].

Перший погляд відноситься до так званої “корпускулярної” теорії і для визначення раціональних режимів вібрування бетонних сумішей слід розглядати рух частинок, що мають власну масу і відповідні сили опору та пружності. У відповідності до цього підходу раціональні параметри можна визначити із умови резонансу окремої частинки [37].

Другий погляд відноситься до розгляду бетонної суміші як неперервної, тобто системи з розподіленими параметрами, коли під дією вібрації розповсюджуються хвилі, які спричиняють появу деформації прошарків суміші і, як наслідок, ущільнення суміші. Раціональні параметри рекомендується [33] отримувати, виходячи з хвильових рівнянь руху і загального резонансу всього об’єму суміші.

Очевидно, в реальних умовах ущільнення бетонної суміші мають право існувати обидві гіпотези, причому на початкових етапах ущільнення, коли суміш ще не є структурованою системою, можливі переміщення окремих частинок з наступним утворенням більш компактної структури і поведінкою суміші як суцільного середовища. Щось подібне, з точки зору об’єднання вищезгаданих напрямків, вказується в роботі [54], де вважається, що кожна “фізична” точка суміші бере участь у двох рухах:

- 1) загальному, що відповідає безперервній деформації суміші як суцільного тіла;
- 2) відносному, що являє собою переміщення частинки як абсолютно твердого тіла.

У цитованій роботі не вказується на яких ділянках процесу ущільнення проявляються ті чи інші рухи. У деяких інших роботах процес ущільнення теж розглядається як такий, що має фази або стадії. Так, в роботі [6] підкреслюється, що існує дві фази ущільнення.

На першій фазі відбувається руйнування структурних зв’язків і суміш перетворюється у в’язку рідину. Ступінь руйнування структури в кожний даний момент пропорційна градієнту швидкості, який виникає при відносному русі частинок.

Друга фаза – самоущільнення, тобто частинки, звільнившись від зв'язків, під дією власної ваги займають найнижче положення і бетонна суміш отримує найбільшу щільність.

У роботі [42] розглядають процес вібраційного формування бетонної суміші, що умовно складається із двох стадій. На першій стадії здійснюється взаємне переміщення і разом з тим перекомпонування крупного заповнювача, активне виділення затиснутого повітря з наступним зменшенням об'єму, що його займає бетонна суміш, і при цьому створюється макроструктура бетону. На другій стадії доущільнюється розчинна складова за рахунок максимального тиксотропного розрідження цементного тіста і затиснутого повітря, а також формуються елементи мікроструктури бетону.

На відміну від [42], в роботі [66] розділяють процес формування не на дві, а на три стадії. На першій стадії відбувається переукладання складових суміші і інтенсивне виділення із неї повітря. Під дією динамічного навантаження процес ущільнення переходить до другої стадії шляхом перебудови випадкової структури, що її має бетонна суміш, у стійку в результаті взаємного перекомпонування зерен заповнювача.

Друга стадія характеризується виділенням рідкої фази і обволіканням нею поверхні крупного заповнювача та зближенням частинок суміші. В цей період переважають сили в'язкого опору, суміш отримує властивості течії та здатність до формоутворення.

На третій стадії відбувається компресійне ущільнення розчинної складової суміші з незначним приростом щільності.

Розглянемо числові значення технологічних параметрів, що пропонуються в тих чи інших роботах.

Перш за все слід підкреслити, що параметри процесу (амплітуда та частота коливань) у значній мірі залежать від режиму вібраційної дії: гармонічного ( $A = 0,35 \dots 0,5 \text{ мм}$ ;  $\omega = 300 \dots 314 \text{ с}^{-1}$ ), віброударного ( $A = 0,75 \dots 1,2 \text{ мм}$ ;  $\omega = 75 \dots 150 \text{ с}^{-1}$ ); низькочастотного, переважно у горизонтальній площині руху ( $A = 0,8 \dots 1,0 \text{ мм}$ ;  $\omega = 150,72 \text{ с}^{-1}$ ).

Низькочастотний режим ( $\omega \approx 95 \text{ с}^{-1}$ ) за даними роботи [51] забезпечує однорідність ущільнення виробу по всій висоті. Там також наведені дані (табл. 1.1) ущільнення бетонної суміші, що має жорсткість 20 с.

Як впливає з таблиці 1.1, міцність бетону на стиск при частоті  $f = 25 \text{ Гц}$  дещо більша, ніж на частоті  $f = 50 \text{ Гц}$ . Цікаві результати представлені у роботі [6] з визначення якості поверхонь (табл. 1.2).

Покращення якості поверхонь, на думку авторів роботи [6], пов'язане із використанням більш низьких частот, що дає можливість повітряним включенням ефективніше мігрувати за межі зони контакту

з формою. Більш низькі частоти при однакових значеннях верхнього  $a_v$  і нижнього  $a_n$  прискорень дають можливість отримати поверхню високої якості з площею пор 0,3...0,6% [45-48].

Покращення якості поверхонь, на думку авторів роботи [6], пов'язане із використанням більш низьких частот, що дає можливість повітряним включенням ефективніше мігрувати за межі зони контакту з формою. Більш низькі частоти при однакових значеннях верхнього  $a_v$  і нижнього  $a_n$  прискорень дають можливість отримати поверхню високої якості з площею пор 0,3...0,6% [4-48].

Таблиця 1.1

Порівняльна характеристика ущільнення бетонної суміші при різних частотах

Час ущільнення, с	Прискорення, $m/c^2$		Міцність бетону на стиск, МПа при частоті, Гц	
	горизонтальне	вертикальне	25	50
160	25	15	36,0	35,3
160	35	15	36,3	35,5
160	15	15	30,7	30,6
100	25	25	35,4	34,3
100	25	5	36,1	33,7
40	25	15	32,3	29,9

І все ж, виходячи із загального уявлення про процес ущільнення бетонної суміші, слід відзначити, що частота нижче 15 Гц при гармонічному віброзбудженні не є ефективною, зокрема, на кінцевій стадії ущільнення. На початковому етапі, коли головна задача – це руйнування зв'язків між частинками, частота не є домінуючою складовою (тут важливо мати відповідні переміщення), але на кінцевому етапі ущільнення висока частота дозволяє розвинути значні стискальні напруження, які приводять до підвищення щільності

Вибір амплітуди коливань є також важливим моментом при визначенні ефективного режиму ущільнення бетонної суміші. Значення амплітуди у значній мірі залежить від складу суміші та частоти коливань. Дійсно, якщо прослідкувати за існуючими рекомендаціями [43, 49, 50], то стає очевидним той факт, що із зменшенням частоти коливань рекомендується реалізовувати більші значення амплітуд коливань і навпаки. Якщо за критерій ефективності процесу  $K_e$  взяти шви-

дкість  $v=A \cdot \omega$ , то для забезпечення одного й того ж значення  $K_e$  необхідно пропорційно змінювати чи то амплітуду, чи частоту.

Таблиця 1.2

Вплив режиму коливань на міцність бетону і якість поверхонь

Жорсткість бетонної суміші, $c$	Режими формування			$R_{cm}$ , МПа	Середня площа пор від площі поверхні, %	
	$f$ , Гц	Прискорення у частках $g$			Бокові	Нижня
		$a_v$	$a_n$			
20	15	2...2,5	6...8	29,5...30	0,85...0,68	0,3...0,2
	25	2...2,5	6	31,5	1,15...1,0	0,6...0,4
	35	2...2,5	6	30,2	-	-

Якщо проаналізувати реальні значення співвідношень амплітуди і частоти, то з'ясується, що показник ефективності дещо більше, ніж значення  $A \cdot \omega$ . Іншими словами, коефіцієнт ефективності наближається до значення  $A \cdot \omega^2$ , тобто до прискорення, як це і пропонується у роботі [51]. Таким чином, ефективність процесу лежить у межах

$$A \cdot \omega < K_e \leq A \cdot \omega^2.$$

Для вибору і обґрунтування режимів стосовно виробу, процес ущільнення якого розглядається у даній роботі, більш ефективним, можливо, має бути залежність  $K_e \leq A \cdot \omega^2$ , оскільки висота виробу ( $h < 0,3$  м) є незначною.

При ущільненні виробів важливим елементом процесу є використання привантаження [55-59]. Привантаження за принципом використання може бути інерційним чи безінерційним. Спеціальні дослідження оцінки впливу привантаження [103-105] показують, що існує оптимальне значення привантаження, величина котрого залежить від режиму роботи обладнання, його параметрів (амплітуди і частоти коливань), висоти виробу та складу бетонної суміші. Що ж до числових значень, то величина привантаження коливається у значних межах від  $50 \cdot 10^{-2} \text{ Н/см}^2$  [61] до  $250 \cdot 10^{-2} \text{ Н/см}^2$  [58]. Очевидно, що відсутність загальноприйнятої моделі процесу ущільнення і приводить до різних результатів. Проте, всі дослідники, які вивчали особливості використання привантаження [33, 55-59, 63-66, 69, 97, 100, 103--105], вважають за доцільне застосовувати привантаження для доущільнення поверхневого шару та вирівнювання поверхні виробу. Як правило, вчені не вказують на необхідність суттєвої зміни параметрів та режиму руху

вібромайданчиків. Єдине, на що вказується [64], це на необхідність витримувати амплітуду коливань вібромайданчика не нижче 0,25 мм.

Таким чином, у результаті оцінювання технологічних параметрів процесу ущільнення бетонних сумішей, можна сформулювати такі основні висновки:

1. Існує певна розбіжність у тлумаченні загальної поведінки бетонної суміші при її ущільненні.

2. Параметри робочого процесу – амплітуда і частота коливань – взаємопов'язані між собою і вибір раціональних їх значень потребує конкретного підходу до умов формування та конфігурації виробу.

Привантаження є раціональним для поліпшення процесу ущільнення і його доцільно використовувати, визначаючи раціональні параметри експериментальним шляхом.

## **1.2 Способи ущільнення бетонних сумішей**

Використання й розробка ефективних прийомів ущільнення, безсумнівно, складне завдання, яке треба вирішувати. Однак, кожен з методів ущільнення повинен забезпечувати [3, 6, 11-14, 33, 43, 49, 50, 54, 59, 73, 74, 96]:

1) зближення на мінімально можливі відстані всіх частинок суміші без її розшарування й механічного руйнування зерен заповнювача, що може відбутися при високих тисках пресування суміші;

2) твердіння з необхідною кількістю води повинно бути трохи більшим, ніж те, що за тривалий період часу піде в хімічний процес;

3) збереження у зразка, який формується (конструкції) при наступному твердінні всієї кількості води затвору;

4) застосування складів бетону з витратами цементу, які застосовуються для готування якісних і довговічних бетонів при якісно організованому вібруванні твердих сумішей;

5) реальні можливості використання в'язких, наявних або доступних для масового застосування в перспективний термін з інших галузей.

Крім вищесказаного необхідно, щоб для кожного виду бетонних сумішей застосовувалися свої методи ущільнення. Так, наприклад, для твердих бетонних сумішей, тобто для сумішей з мінімально можливим вмістом води, необхідне використання механічного трамбування й/або вібрування з притисканням [72].

З розвитком цементної промисловості й випуском високоякісного цементу стали застосовувати литі суміші зі значним надлишком води [6, 30, 70]. Ущільнення таких сумішей відбувається довільно під дією сили ваги піску й гравію (щебенів). Однак їхнє застосування ду-

же обмежене через їхні недоліки: надлишок води приводить до значного розшарування по висоті конструкцій [6, 29, 32, 70, 71]. Через відокремлення води в процесі седиментації цементної суспензії цементного тесту, розведеного надлишком води, зчеплення бетону з арматурами також різко знижується.

Найпоширеніші в будівництві малопластичні бетонні суміші ущільнюються за допомогою вібрування [24, 25, 54, 66]. І в цьому випадку, певною мірою використовується властивість сумішей розподілятися в опалубці з меншою витратою праці [24], гарантією заповнення форми будь-якої складності й одержання бетону з технічними властивостями, що забезпечують проектні вимоги. Середньо- і високопластичні бетонні суміші з метою відділення із вже покладеної суміші частини води піддають вібровакумуванню [76-78], а для виробів циліндричної форми, наприклад труб і опор – центрифугуванню [6, 62].

Розглянемо деякі способи ущільнення різних бетонних сумішей.

**1.2.1. Механічне трамбування.** Основне застосування механічного трамбування або пресування полягає в рівномірному розподілі бетонної суміші в заданому обсязі і її ущільненні під дією прикладених силових навантажень. Як вже говорилося вище – цей спосіб переважно застосовують для бетонних сумішей, які мають малу текучість (твердих). Під час застосування механічного трамбування як правило ставиться дві мети: надання форми і ущільнення.

Під час трамбування відбувається примусове переміщення й взаємне зближення твердих компонентів суміші, що призводить до найбільш компактного розміщення їх у необхідному певному обсязі. У цей же час відбувається видавлювання вільної води й повітря у середину бетонної суміші [79]. Оптимальний тиск при пресуванні найчастіше становить  $5...15 \text{ МПа}$  [70]. У першу чергу він залежить від кількості води в суміші, а також її зернового складу. З підвищенням вологості зменшується внутрішнє тертя часточок, однак це заважає виходу повітря й одержанню щільної структури. Кращі умови для трамбування або пресування забезпечуються при безперервній гранулометрії й максимальному розмірі зерен до  $3 \text{ мм}$  [79].

Ущільнення бетонної суміші й надання їй форми пресуванням можна виконувати методом штампування з передачею навантаження, що пресує, через штамп, яке перекриває всю площу виробу й формує лицьову й тильну поверхні [80]. Відомий також спосіб трамбування за допомогою катків, що переміщуються по покладеній у форму суміші [69].



**1.2.2. Вібрування.** Вібрування – це коливальний процес, що характеризується величинами амплітуди, частоти й інтенсивності коливань [6].

Методи вібрування належать до найпоширеніших способів ущільнення бетонних композитів [3, 14, 17, 18, 24, 30, 54]. Понад 90% всіх виробів з бетону й залізобетону виготовляється з використанням вібрації. Це пояснюється тим, що в процесі вібраційного впливу на бетонні суміші створюються умови для тиксотропного розрідження й найбільш компактного розміщення частинок.

Досліди по вібруванню було розпочато ще наприкінці двадцятих – початку тридцятих років минулого століття [12-14]. Сутність процесу ущільнення сумішей з використанням вібрування заснована на тимчасовому й оборотному тиксотропному розрідженні цементної маси, що після припинення струсів знову набуває вихідної в'язкості у середовищі змішаних з масою великих і дрібних заповнювачів [13]. Ще в 1934р. П.М. Миклашевський, консультуючи проведені в Москві бетонні роботи й керуючи дослідженнями з вібрування сумішей, відзначив, що бетонна суміш при вібруванні набуває властивості важкої рідини [13].

Розглядаючи фізичну сутність вібраційного процесу ущільнення, багато дослідників вважають, що під час вібрування усувається шкідливий вплив сил тертя й зчеплення, що діють на суміжні частки бетонної суміші [3, 6]. З усіх сил тільки сила ваги прагне ущільнити бетонну суміш, а сили тертя й зчеплення перешкоджають цьому процесу. У той же час А. Е. Десов [12] підкреслює, що ефект вібрування залежить як від в'язкості середовища, так і від форми, розмірів і характеру поверхні частинок, кількості твердої фази, а головне – від значення й частоти імпульсів, що передаються частинками бетонній суміші. Вібрація передає бетонній суміші імпульси, внаслідок чого частинки коливаються близько середнього напрямку руху [12, 34, 50]. Бетонна суміш переходить зі стану аморфного тіла в стан "важкої рідини" [14, 54]. У цій розрідженій бетонній суміші частинки переміщуються під дією сили ваги й на поверхні виділяється повітря у вигляді бульбашок. Про стан тимчасової текучості розчину й бетонної суміші докладно йдеться в роботах П. А. Ребиндера, Н. В. Михайлова, П.Ф. Овчинникова, Н. Б. Ур'єва [34, 75, 80, 88]. Таким чином, процес вібраційного ущільнення розглядається деякими вченими як тиксотропне розрідження цементних систем і зближення частинок під дією сил ваги.

В цих умовах процес ущільнення умовно поділяють на певну кількість стадій. Так, на думку О. А. Савинова, він поділяється на три стадії [54, 66]: на першій відбувається перекомпонування складових,

на другій з'являються оболонки й рідка фаза на поверхні великого заповнювача, на третій – компресійний стиск суміші.

Деякі автори, розділяючи таку точку зору на процес вібраційного ущільнення, вважають його більш складним [6]. На їхню думку у зв'язку з уявленням про бетон як про композиційний матеріал, що має макро- і мікроособливості, доцільно умовно поділити процес на дві стадії; перша – перекомпонування великих складових (щебенів) і утворення макроструктури; друга – більш глибоких тиксотропних змін у дрібнодисперсній (цементній) системі й формування мікроструктури.

На першій стадії рекомендуються коливання низької частоти з великою амплітудою переміщення, коли долаються сили зчеплення й сухого тертя неуцільнених частинок бетонної суміші, що відповідає уявленням про бетонну суміш як про модель з пластичними властивостями (моделі Бінгама). Для цього потрібні набагато більші амплітуди (1..5 мм) і необхідна інтенсивність по прискоренню 1,5...3,5 g для подолання граничної напруги зсуву залежно від властивостей середовища й розмірів великого заповнювача.

На другій стадії відбувається додаткове ущільнення, що буде протікати інтенсивно при значних тиксотропних змінах. Для розрідження розчинної складової доцільні підвищені частоти або введення пластифікуючих добавок. Зниження в'язкості описується з використанням моделі Кельвіна-Фойгта.

Обидва процеси відбуваються одночасно, але для низьких частот і більших амплітуд швидше протікає перша стадія. Для середніх (50 Гц) і підвищених частот на процес ущільнення більший вплив чинить тиксотропне розрідження.

Відповідно до положень роботи [3] параметри вібрації пропонуються призначати так, щоб домогтися компактного впакування дрібних частинок. Існує також думка [3, 11], яка зводиться до того, що в основному необхідно створити умови для переміщення крупних зерен заповнювача, тому що для більш дрібних цей режим вібрування буде служити вторинним джерелом коливань, що сприяють більш щільному їх впакуванню в бетонній суміші. Відповідно до результатів досліджень [3, 88], зроблений висновок, що ущільнення бетонної суміші повинне починатися з великого заповнювача, а потім шляхом змін частоти й амплітуди варто укладати дрібні фракції, які при відповідних переміщеннях розташовуються в проміжках між більшими зернами. Передбачається, що таким чином буде досягнуто максимального ущільнення бетонної суміші. Відомі пропозиції, які стосуються одночасного накладання різних частот (полічастотне вібрування), при якому

всі зерна твердої фази (включаючи частинки цементу) можуть одночасно компактно розташуватися в бетонній суміші [92].

Слід зазначити, що більша частина дослідників розглядає вібрування в основному як метод механічного ущільнення бетонної суміші без відповідного врахування здатності цементних частинок утворювати під час взаємодії з водою коагуляційну структуру [3, 10, 88, 91]. Тим часом, вібрування розцінюється не тільки як метод механічного ущільнення бетонної суміші, але і як засіб впливу на фізико-хімічні процеси, що сприяють активізації коагуляційного ущільнення цементного гелю, гомогенізації бетонної суміші в цілому. Тому питання теорії вібрування не можуть бути зведені тільки до кінетики впакування різних фракцій зерен заповнювача, тому що визначальним в процесі ущільнення бетонної суміші є механізм формування щільної коагуляційної структури цементного гелю.

Існують різні способи вдосконалення процесів віброущільнення бетонної суміші.

Одним з них є повторне багаторазове вібрування бетонної суміші. Досліди деяких науковців показують, що повторне вібрування вже ущільненої бетонної суміші протягом 10 *годин*. не лише не знижує межі міцності бетону, а й значно підвищує її. Автори вказують, що повторне вібрування збільшує зчеплення бетону з арматурами [24, 92].

За рахунок збільшення загального часу повторного вібрування, а також за рахунок зменшення перерв між черговими вібруваннями з бетонної суміші відбувається часткове видалення вільної води. Це дозволяє значно підвищити технологічні властивості бетону. Завдяки частковому видаленню води в процесі багаторазового вібрування (що вимагає 6...8 *годин* додаткового часу) після пропарювання тільки що сформованої бетонної суміші в структурі новоутворень з цементної маси утворюється значно більше вакуумних порожнин у капілярах. Це забезпечує диспергування повітря, що розширюється, утворення мікроамортизаторів і у свою чергу веде до підвищення експлуатаційних властивостей бетонів.

Електронно-мікроскопічний аналіз цементного каменю, який піддається і не піддається повторному вібруванню, показує розходження їхніх структур, вказуючи на процес модифікованого кристалювання в цементному камені повторно віброваних бетонів [8, 19]. Отже, вихідна загальна порожнинність визначається не тільки кількістю води в бетоні, але і її розподілом у бетонній суміші після приготування.

Іншим прикладом удосконалення процесів віброущільнення бетонної суміші є використання ущільнення з високою частотою вібрації [6, 13]. Застосування височастотної віброобробки в першу чергу

позначається на зміні міцності цементного каменю (бетону). Фізико – хімічні процеси, які виникають внаслідок високочастотного вібрування підвищують міцність зразків в усі строки твердіння. Спостерігається підвищення міцнісних характеристик в 1,3-1,35 рази [70]. Із збільшенням вмісту води відносний приріст міцності цементного каменю зменшується.

Одним з видів вібраційного впливу на бетонну суміш є ультразвукове вібрування [92]. Ультразвуковий вплив сприяє прискоренню процесу розчинення твердих частинок, оскільки при виникненні стоячих хвиль порушуються адсорбційний і дифузійний шари, а кавітаційні явища викликають утворення в кристалах великої кількості мікротріщин, що сприяють руйнуванню й розчиненню речовини. В результаті зростає активна поверхня й швидкість розчинення твердої фази. Дослідженнями [95] показано, що під час глибинного й поверхневого ультразвукового вібрування цементного гелю формуються різні за фізико-механічними властивостями структури цементного каменю. В процесі обробки глибинним ультразвуковим магнітострикційним вібратором (хвилеводом з мембраною) у цементному гелі відбуваються дезагрегація флокул і локальне кавітаційне диспергування цементних частинок.

Під час обробки цементного гелю глибинним ультразвуковим вібратором приріст об'ємної маси зразків цементного каменю досягає 9,5%, а міцність бетону може зрости майже у два рази [3, 95].

Відомий також спосіб віброобробки розігрітої бетонної суміші [3, 6]. Під час нагрівання бетонної суміші до певної температури знижується в'язкість рідкої фази, збільшується концентрація активних іонів мінералів цементу, що сприяє подоланню енергетичного бар'єра, обумовленого наявністю подвійного електричного шару, і зростанню кінетичної енергії взаємодії частинок. Все це сприяє скороченню тривалості індукційного періоду й формуванню більш впорядкованої кристалогідратної структури цементного каменю [94]. Таким чином, прискорюється процес структуроутворення бетону, а склад продуктів гідратації залишається практично таким самим, як і при нормальних умовах твердіння бетону.

Незважаючи на принципову ефективність застосування гарячої бетонної суміші, не завжди вдається реалізувати її приховані енергетичні властивості [3, 6, 94]. У зв'язку з цим міцність бетонних зразків з гарячої суміші в певних випадках виявляється нижче, ніж у зразків, отриманих з нерозігрітої суміші.

### 1.2.3. Ущільнення бетонної суміші методом центрифугування.

Сутність відцентрового формовання й ущільнення полягає в тому, що при обертанні форми з рівномірно розподіленою в ній бетонною сумішшю навколо нерухомої осі з певною швидкістю виникає відцентровий тиск, що пресує, під впливом якого із цементного гелю віджимається рідина зі зваженими в ній високодисперсними фракціями й одночасно зближуються більші частинки твердої фази. В результаті такого процесу зростає зв'язність цементного гелю й досягається ущільнення бетонної суміші [3, 6, 95].

Здатність бетонної суміші рівномірно розподілятися по внутрішній поверхні обертової форми визначається в'язопластичними властивостями цементного гелю. Якщо помістити в'язопластичну або короткочасно розріджену вібрацією бетонну суміш в обертову форму, то під дією відцентрового радіально спрямованого тиску вона стане деформуватися – розтікатися в усі сторони. Це буде відбуватися до того часу, доки не настане рівновага між силами, що сприяють розподілу суміші у формі, і структурним опором стиску цементного гелю. Із збільшенням швидкості обертання форми з цементного гелю почне віджиматися рідка фаза і це буде відбуватися до того часу, доки ущільнена бетонна суміш не набуде властивості псевдотвердого тіла, деформація якого може проявлятися в основному у вигляді пружної післядії.

Відцентровий тиск безпосередньо сприймається рідкою фазою, у зв'язку з чим зростає надлишковий гідростатичний тиск, під впливом якого фільтрується рідина й одночасно ущільнюється бетонна суміш [96]. У результаті зменшується стисненість цементного гелю й установлюється рівноважний стан, який характеризується внутрішнім перерозподілом тиску й припиненням фільтраційного процесу через значний опір руху рідини по каналах, які утворюються. У результаті такого способу укладання й ущільнення бетонної суміші досягається однорідна структура центрифугованого бетону. Важливо зазначити, що існує також пошарове центрифугування. Кількість шарів бетону, необхідна для досягнення практично однорідної структури бетону залежить, за інших рівнозначних умов, головним чином від товщини стінки виробу: чим вона більша, тим більше повинно бути послідовно ущільнених шарів. Поверхні поділу між шарами, як правило, важковідмінні. У ряді випадків вони помітні, коли віджятий шлак неповністю вилучений і його частина, що залишилася, не перерозподілилася при укладанні наступного бетонного шару.

Під час ущільнення бетонної суміші методом центрифугування головним чином досягається зміна водоцементної частки бетонної суміші. Зменшення водоцементного відношення (В/Ц) у свою чергу веде

Шановний читачу!

Умови придбання надрукованих примірників монографії наведені на сайті видавництва <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-221-1>

Уважаемый читатель!

Условия приобретения печатных экземпляров монографии приведены на сайте издательства <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-221-1>

Dear reader!

You may order this monograph at the Web page <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-221-1>

Наукове видання

**Ратушняк Георгій Сергійович  
Слободян Наталія Михайлівна**

**ВІБРОСИЛОВА ТЕХНОЛОГІЯ ФОРМУВАННЯ  
ДЕКОРАТИВНИХ БЕТОННИХ ВИРОБІВ**

Монографія

Редактор Т. Ягельська

Оригінал-макет підготовлено Н. Слободян

Видавництво ВНТУ «УНІВЕРСУМ-Вінниця»  
Свідоцтво Держкомінформ України  
Серія ДК № 746 від 25.12.2001  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к.114  
Тел.: (0432) 59-85-32

Підписано до друку 23.05.2007р.  
Формат 29,7x42¼ Папір офсетний  
Гарнітура Times New Roman  
Друк різнографічний Ум. друк. арк. 9,3  
Наклад. 100 прим. Зам № 2007-081

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі  
Вінницького національного технічного університету  
Свідоцтво Держкомінформу України  
серія ДК № 746 від 25.12.2001р.  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, головний корпус, к.114  
Тел.: (0432) 59-81-59