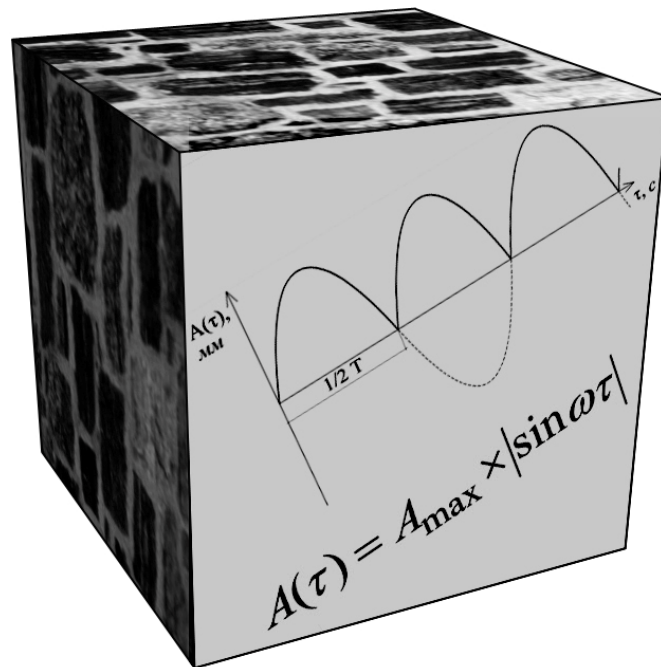


**В. П. Загреба, І. Н. Дудар, А. О. Коваленко**

**ТЕХНОЛОГІЯ РОЗДІЛЬНОГО  
ВІБРОІМПУЛЬСНОГО ФОРМУВАННЯ  
КАМЕНЕБЕТОННИХ ВИРОБІВ**



Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Вінницький національний технічний університет

**В. П. Загреба, І. Н. Дудар, А. О. Коваленко**

**ТЕХНОЛОГІЯ РОЗДІЛЬНОГО  
ВІБРОІМПУЛЬСНОГО ФОРМУВАННЯ  
КАМЕНЕБЕТОННИХ ВИРОБІВ**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2012

УДК 666.972.123

ББК 38.626.1

З-14

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України (протокол № 6 від 26.01.2012 р.)

Рецензенти:

**М. Ф. Друкований**, доктор технічних наук, професор

**А. С. Моргун**, доктор технічних наук, професор

**Загреба, В. П.**

З-14      Технологія роздільного віброімпульсного формування каменебетонних виробів : монографія / В. П. Загреба, І. Н. Дудар, А. О. Коваленко. — Вінниця : ВНТУ, 2012. — 92 с.

ISBN 978-966-641-493-2

В монографії розглядаються теоретичні та практичні питання вдосконалення технології роздільного формування масивних малоармованих виробів із каменебетону. Запропонована математична модель визначення раціонального співвідношення між кам'яною накидкою і дрібнозернистою бетонною сумішшю. Встановлено раціональні параметри режиму віброімпульсного формування каменебетонних виробів. Розроблена методика розрахунку і рекомендації щодо підбору складу каменебетонної суміші. Результати дослідно-промислових досліджень дозволяють вказати на доцільність впровадження методу при виготовленні масивних малоармованих виробів.

**УДК 666.972.123**

**ББК 38.626.1**

**ISBN 978-966-641-493-2**

© В. Загреба, І. Дудар, А. Коваленко, 2012

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	4
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОЗДІЛЬНОГО ФОРМУВАННЯ БЕТОННИХ ТА БУТОБЕТОННИХ ВИРОБІВ .....	5
1.1 Технологічні особливості роздільного віброформування бетонних та бутобетонних виробів .....	5
1.2 Віброформування як спосіб ущільнення бетонної суміші.....	12
1.3 Основи проектування складу бетонної суміші .....	23
1.4 Висновки .....	30
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗДІЛЬНОГО ВІБРОІМПУЛЬСНОГО ФОРМУВАННЯ. МЕТОДИКА І УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	32
2.1 Теоретичне обґрунтування методу роздільного віброімпульсного формування каменебетонних виробів .....	32
2.2 Обладнання, методика і матеріали для експериментальних досліджень .....	41
РОЗДІЛ 3 ПРОЕКТУВАННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДУ КАМЕНЕБЕТОННОЇ СУМІШІ .....	52
3.1 Теоретична суть проектування складу каменебетонної суміші .	52
3.2 Підбір і оптимізація складу компонентів каменебетонної суміші .....	55
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РОЗДІЛЬНОГО ВІБРОІМПУЛЬСНОГО ФОРМУВАННЯ КАМЕНЕБЕТОННИХ ВИРОБІВ .....	65
4.1 Визначення раціональної частоти віброімпульсів ущільнювально- перемішувального формування.....	65
4.2 Визначення раціональної амплітуди віброімпульсів ущільнювально- перемішувального формування каменебетонної суміші .....	67
4.3 Експериментальні дослідження з визначення раціонального часу віброімпульсного формування .....	70
РОЗДІЛ 5 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	75
5.1 Рекомендації щодо підбору складу суміші і режимів формування каменебетонних виробів.....	75
5.2 Конструктивно-технологічні нароби впровадження формування каменебетонних виробів.....	78
ВИСНОВКИ.....	83
ЛІТЕРАТУРА .....	84

## ВСТУП

Проблема економії ресурсів і енергозбереження у галузі будівництва і будівельної індустрії в наш час є особливо актуальною. Важливим питанням при виготовленні виробів із бетону є зниження питомих витрат складових і особливо цементу як найбільш енергоємного компонента. А тому в монографії викладені результати наукових і практичних досліджень технології роздільного формування масивних малоармованих виробів із каменебетону, що в поєднанні з низькочастотним імпульсно-перемішувальним ущільненням дозволяє досягти бажаного результату.

Розроблено методику і рекомендації проектування п'ятикомпонентного складу каменебетонної суміші. Визначено оптимальні співвідношення компонентів і їх технологічні характеристики.

Наведено результати досліджень режиму низькочастотного імпульсно-перемішуючого формування виробів із каменебетону. Встановлені раціональні параметри частоти, амплітуди і тривалості формування.

Розроблено лабораторну модель і дослідно-промислову оснастку для дослідження і промислового опробування технології при виготовленні каменебетонних блоків стін підвалу. Важливим елементом в конструкції оснастки є еластична діафрагма, що передає низькочастотні віброімпульси безпосередньо на бетонну суміш і кам'яну накидку, що укладені пошарово та роздільно.

Виготовлення каменебетонних фундаментних блоків стін підвалу (ФБС) в заводських умовах підтвердило ефективність цієї технології.

Монографія призначена і може бути корисною для наукових працівників і виробничників, що працюють в галузі бетонознавства над проблемами економії ресурсів і енергозбереження.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОЗДІЛЬНОГО ФОРМУВАННЯ БЕТОННИХ ТА БУТОБЕТОННИХ ВИРОБІВ

### 1.1 Технологічні особливості роздільного віброформування бетонних та бутобетонних виробів

При виконанні бетонних і залізобетонних робіт особливе місце займають операції з приготування і укладання бетонної суміші. Ефективним напрямом вдосконалення технології виконання цих операцій є роздільне укладання складових бетону – крупного заповнювача і цементно-піщаного розчину.

Технологія методу роздільного бетонування полягає в тому, що крупний заповнювач і розчинну бетонну суміш подають в опалубку по черзі, роздільно.

Методи роздільного бетонування полягають в нагнітанні цементно-піщаного розчину в порожнини між крупним заповнювачем, що заздалегідь укладений в опалубку конструкції. Ці методи застосовуються при зведенні залізобетонних резервуарів, при бетонуванні в умовах інтенсивного припливу ґрунтових вод та в інших випадках, де вимагається підвищена щільність бетону.

Розрізняють два способи роздільного бетонування: гравітаційний та ін'єкційний. При гравітаційному способі розчин проникає у крупний заповнювач під дією сил тяжіння, а при ін'єкційному – під тиском, що створює нагнітач. Ін'єкційний спосіб є ефективнішим і застосовується при бетонуванні тонкостінних конструкцій (рис. 1.1). При товщині конструкції більше 1 м розчин нагнітають у крупний заповнювач через сталеві ін'єкційні труби, що встановлюються в опалубку, а при товщині конструкції менше 1 м – через бічні ін'єкційні отвори. Мінімальний розмір зерен крупного заповнювача – не менше 40 мм, а максимальний розмір приймається за вимогами нормативних документів. Модуль крупності піску повинен бути не більше 1,8, а співвідношення між найбільшим розміром зерен піску в розчині і мінімальним розміром зерен крупного заповнювача не повинне перевищувати 1:10. При цьому час, що відводиться на бетонування ярусу, не повинен перевищувати тривалість схоплювання цементу в розчині [1].

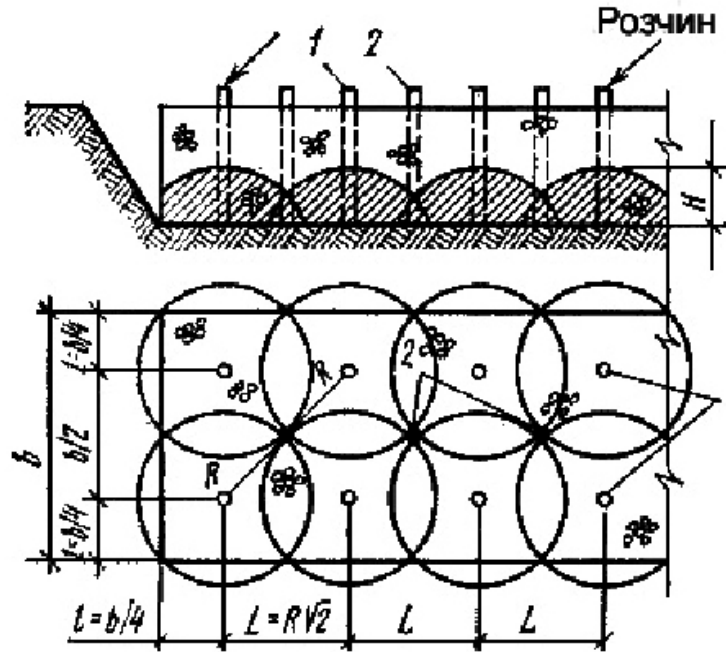


Рисунок 1.1 – Розміщення труб і ін'єкційних отворів при роздільному бетонуванні: 1 – ін'єкційні труби; 2 – контрольні

Для нагнітання розчину можуть застосовуватися розчинонасоси. Подача розчину припиняється після того, як рівень розчину досягне чергового ярусу ін'єкційних отворів. При бетонуванні роздільним способом не допускаються перерви в бетонуванні більше 20 хв., оскільки може статися закупорка ін'єкційних труб і отворів.

Однак ін'єкційні способи мають істотні недоліки, що обмежують область їх застосування [2–4]. Основні з них такі:

- необхідність використання розчинів з високим водоцементним відношенням;

- збільшений вміст в бетоні цементного каменю і можливість появи «сухих» контактів між окремими зернами крупного заповнювача.

Використання методу роздільного бетонування дозволяє отримати певний техніко-економічний ефект.

Цей ефект досягається за рахунок того, що відпадає необхідність в приготуванні дрібнозернистих бетонних сумішей, застосування крупного заповнювача дозволяє економити цемент, а технологічність методу відкриває широкі можливості для застосування комплексної механізації.

В результаті приведені витрати виявляються на 10...15 % нижчими, ніж при звичайному способі бетонування. При цьому трудомісткість робіт зменшується на 20...30 % [5].

Підводне бетонування застосовується при зведенні конструкцій і споруд, що розташовуються у водоймах або ґрунтах з високим рівнем ґрунтових вод.

Існує два способи підводного бетонування: вертикального переміщення труб (ВПТ) і висхідного розчину (ВР).

Суть способу ВПТ полягає в тому, що бетонна суміш подається через опущені до основи майбутньої споруди труби діаметром 200...300 мм і розтікається по формі. По мірі збільшення товщини бетонного шару труби за допомогою поліспасти і лебідки піднімаються і зайві ланки видаляються. Радіус дії труби не повинен перевищувати 6 м, при цьому нижній кінець труби має бути постійно заглиблений в бетонну суміш не менше, ніж на 0,8 м при глибині бетонування до 10 м; на 1,5 м – при глибині бетонування до 20 м і на 2,5 м – при глибині бетонування більше 20 м. Дотичний до води верхній шар бетону (рис. 1.2) після закінчення бетонування видаляється.

За допомогою методу ВР можна здійснювати безнапірне і напірне бетонування. Суть методу полягає в тому, що в межах обгородженої ділянки розміщують кам'яну накидку, в якій з певним інтервалом виставлені дерев'яні шахти. У шахтах встановлюють сталеві труби діаметром 37...100 мм, по яких самопливом подається розчин, який в шахті розтікається і, поступово піднімаючись, заповнює порожнини в кам'яній накидці [5].

Різновидом методу ВР є напірний метод, при якому труби встановлюють без шахт безпосередньо в кам'яну накидку, що дозволяє більш повно використовувати тиск розчину в трубі.

Розвитком цього методу є використання подачі розчину під тиском розчинонасосом або пневматичним нагнітачем [5].

Торкретування полягає в послідовному нанесенні на оброблювану бетонну поверхню шарів цементно-піщаного розчину (торкрет) за допомогою цемент-пушки або бетонної суміші за допомогою бетоншприц-машини (рис. 1.3).

Торкретування використовують для виправлення дефектів в бетонних і залізобетонних конструкціях або для бетонування тонкостінних конструкцій, де використання звичайних способів бетонування ускладнено або не забезпечується необхідна щільність бетону.



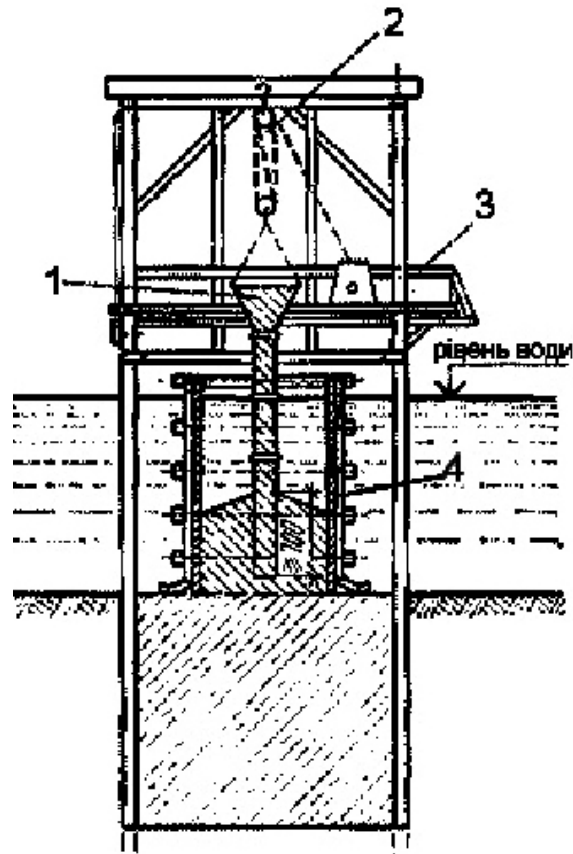


Рисунок 1.2 – Схема підводного бетонування методом вертикального переміщення труби: 1 – труби для подачі бетонної суміші; 2 – поліспаст для підйому труби; 3 – естакада; 4 – опалубка

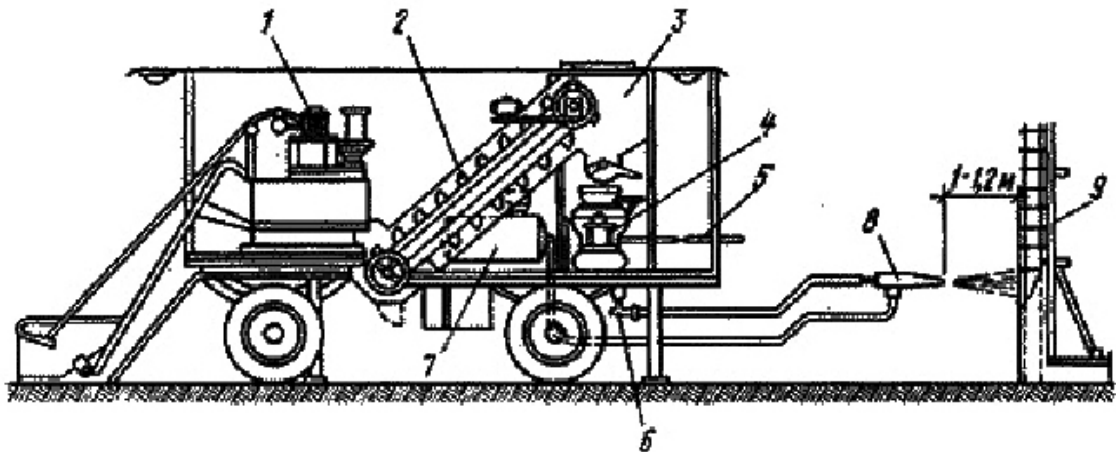


Рисунок 1.3 – Бетонування методом «набризк-бетон»:  
 1 – спентель; 2 – похилий елеватор; 3 – витратний бункер;  
 4 – ментель; 5 – подача стислого повітря; 6 – вихідний штуцер;  
 7 – бак для води; 8 – сопло; 9 – опалубка

Принципи роботи цемент-пушки і бетон-шприц-машини схожі. Суха цементно-піщана суміш вологістю 6...8 % або бетонна суміш з резервуару під тиском стислого повітря подається через шланг до наконечника, де, змішуючись з водою, наноситься із швидкістю 120...140 м/с на оброблювану поверхню бетону або арматурну сітку [5].

Для каменебетону характерний метод пошарового укладання (шарами товщиною 20...30 см) бетонної суміші з найбільшою крупністю заповнювача 30...40 мм при дещо збільшеній витраті цементу з наступним введенням вібраційними установками в свіжоукладену бетонну суміш заповнювача крупністю до 200...300 мм. Сумарна витрата в'язучого при такому способі може становити 180 кг/м<sup>3</sup> і менше [6–10].

При проникненні кам'яної накладки в бетонну суміш у кількості 20...25 % від загального об'єму бетону можна знизити витрату цементу на 1 м<sup>3</sup> бетону до 210...225 кг при одночасному збереженні проектної марки бетону. При більш високому вмісті кам'яної накладки відповідно знижується витрата цементу. За рахунок рівномірного розташування крупного заповнювача було досягнуто підвищення міцності бетону на стиск на 10...12 %, цьому, на думку авторів [11–14], також сприяла інтенсифікація процесу гідратації цементу.

До другої групи методів роздільного бетонування відносять спадний (СР) і висхідний (ВР) способи подачі розчину. Причому заповнення міжзернового простору крупного заповнювача цементно-піщаним розчином при ВР може відбуватися або під впливом гравітаційних сил, або ін'єкційним способом [1].

Для усунення цих недоліків описаних способів і розширення області застосування роздільного бетонування В. П. Проценко запропонував спосіб роздільного бетонування, названий вібронагнітаючим [15–22]. Суть цього способу полягає в нагнітанні цементно-піщаного розчину в міжзерновий простір укладеного в опалубку крупного заповнювача при одночасному вібруванні розчину, заповнювача та бетонної суміші, що створюється.

Було встановлено, що під впливом тиску і вібрування цементно-піщаний розчин з В/Ц = 0,35...0,5 просувається в міжзерновому просторі крупного заповнювача на відстань, що перевищує дальність проникнення такого ж розчину без вібрування в 2...2,5 рази. Разом з тим,

в процесі вібрування відбувається свого роду віброперемішування складових бетонної суміші і досягається обволікання зерен заповнювача цементним тістом з щільною укладкою їх в конструкцію.

Вібронагнітаючий спосіб дозволяє отримати бетони широкого діапазону міцності, в тому числі і бетон для відповідальних конструкцій. Так, при використанні в якості крупного заповнювача щебеню фракції 20...40 мм, піску крупністю до 2,5 мм, складу цементно-піщаного розчину 1:1,5 і водоцементному відношенні 0,4 рухливість становила 11 см. У цьому випадку, при витраті цементу  $500 \text{ кг/м}^3$  міцність бетону при стиску становила 60 МПа [21].

У шахтному будівництві при бетонуванні кріплення горизонтальних і вертикальних гірничих виробок роздільне укладання дозволяє скоротити кількість робочих швів і підвищити водонепроникність бетону, що особливо важливо при великому припливі ґрунтових вод. У цьому випадку капітальні витрати на бетонні роботи і фонд заробітної плати знижуються відповідно на 17 % і 35 % в порівнянні з витратами при звичайній технології бетонування крепу [23, 24].

За кордоном метод роздільного бетонування застосовували виключно в монолітному будівництві. В якості крупного заповнювача, як правило, застосовувався щебінь з крупністю зерен від 20 до 140 мм. При відношенні цементу і піску за масою в розчині від 1:2,0 до 1:2,5 і водоцементному відношенні 0,6...0,7 міцність бетону становила від 18 до 34 МПа [25–29].

Метод заливки крупного заповнювача зверху цементно-піщаним розчином широко застосовується за кордоном для будівництва конструкцій великої площі і малої товщини (дороги, автомобільні стоянки, тротуари та ін.) [30–32].

Застосування вібрації при заливці крупного заповнювача розчином збільшує глибину проникнення останнього до 0,5 м і покращує якість бетону, однак для конструкцій значної товщини цей спосіб неприйнятний.

Аналіз результатів науково-дослідних робіт і досвіду практичного застосування роздільного бетонування показує, що цей метод в певних умовах має перед традиційним методом приготування і укладання бетонної суміші такі переваги:

– бетони, отримані роздільним укладанням, мають міцність на стиск більш високу в ранньому віці. При однаковій витраті цементу

міцність роздільно укладеного бетону при стиску вища міцності бетону звичайного укладання на 10...12 %. У дрібнозернистих бетонах з витратою цементу 450...500 кг/м<sup>3</sup> і вище подальше збільшення міцності на стиск не відбувається внаслідок того, що навантаження сприймає скелет кам'яної накидки. Існує думка, що міцність каменебетону при розтягуванні нижча міцності звичайного бетону, однак не у всіх випадках це підтверджувалося [33–35];

- зменшується обсяг матеріалу, що перемішується, оскільки змішуються тільки цемент, пісок і вода [36];

- можливість збільшення крупності зерен крупного заповнювача, оскільки при роздільному бетонуванні крупний заповнювач не направляють в змішувачі, які придатні для перемішування зерен обмеженої крупності, а також тому, що виключається небезпека погіршення якості бетону через розшарування бетонної суміші при транспортуванні;

- підвищення крупності заповнювача призводить до економії найбільш дефіцитної частини бетону – цементу, а також дозволяє знизити вартість, оскільки витрати на подрібнення різко зменшуються. Крім того створюються умови для більш повної, ніж при традиційному способі, автоматизації і механізації робіт і, отже, скорочується їх трудомісткість, досягається зниження потреби в робочій силі, зайнятої на розподілі і укладання бетонної суміші;

- можливість створення мобільних установок завдяки значному зниженню маси виробничого та змішувального обладнання [37, 38];

- полегшуються роботи в зимових умовах [39], оскільки транспортується тільки 35 % від загального обсягу матеріалу, який потрібно утеплювати. Крупний заповнювач можна прогрівати безпосередньо в опалубці перед подачею розчину;

- полегшуються роботи в районах з дуже жарким кліматом, коли необхідно швидко використовувати розчин після його приготування. Від моменту приготування розчину до його укладання може пройти лише кілька хвилин [33, 35];

- наявність двох незалежних потоків матеріалів і можливість деякого розриву в часі між укладанням крупного заповнювача і подачею розчину забезпечує більш гнучку організацію робіт та підвищений темп укладання;

- здешевлення транспортних перевезень складових бетонної суміші, оскільки транспортувати великий заповнювач значно простіше,

ніж бетонну суміш. Розчин подають по трубах, тобто застосовують економічний спосіб його доставки;

– зменшується порожнистість крупного заповнювача при використанні двох фракцій заповнювача; коли розмір більшої фракції в 6...10 разів перевищує розмір меншої, можливе зниження порожнистості до 30...35 % [40–43];

– полегшення умов бетонування конструкцій у важкодоступних місцях, в тому числі і під водою.

Однак всі перераховані переваги методу роздільного бетонування не виключають необхідності ретельно вести роботи і попередньо вивчати використані матеріали. При методі роздільного бетонування вимоги до використовуваних матеріалів вельми високі. Крупний заповнювач повинен бути чистим і не містити дрібних фракцій, наявність яких ускладнює проникнення цементно-піщаного розчину в міжзерновий простір, а сам цементно-піщаний розчин повинен бути ретельно перемішаний, володіти високою текучістю, не розшаровуватися і не містити фракцій піску понад 2,5 мм. Більш високі вимоги при методі роздільного бетонування висуваються також до опалубки конструкцій. Вона повинна бути розчино-непроникною, а в разі подачі розчину нагнітанням ще й досить жорсткою.

## **1.2 Віброформування як спосіб ущільнення бетонної суміші**

Однією з найважливіших технологічних операцій в заводському виробництві збірного залізобетону є ущільнення бетонної суміші, оскільки саме в процесі ущільнення мають бути досягнуті потрібна міра щільності і однорідності бетонних виробів. Недоущільнення бетонної суміші на 1 % знижує міцнісні характеристики бетону на величину до 5...7 %.

Віброформування як спосіб ущільнення стало широко застосовуватися в будівництві лише на початку 30-х років ХХ століття. У 1933 році вібратори були застосовані на будівництві дніпровських комбінатів і гідрокомплексу «Свирь-2» [44, 45].

Експериментально-теоретичні роботи з вивчення дії вібрації на ущільнення бетонних сумішей і інших середовищ відносяться до пізнішого періоду – кінця 40-х років.

Широко розповсюдженим видом віброформування є віброущільнення на станку, при якому форму з бетонною сумішшю встановлю-

ють на віброплощадку, яку піддають коливанням від вібруючого органу. Для станкового вібрування застосовуються віброплощадки різного виду, в чому і полягають технологічні особливості методу. Класифікують віброплощадки за компонованням стола і вібруючого органу, вантажопідйомністю і основними параметрами вібрації. Розрізняють віброплощадки з вертикально направленою вібрацією, що мають один стіл з розташованим знизу віброзбуджувачем, і віброплощадки блочного типу, що складаються з уніфікованих блоків з одним віброзбуджувачем, розташованим під столом одного з блоків.

Вантажопідйомність площадок визначається потужністю привідних двигунів. Найбільш розповсюджені віброплощадки вантажопідйомністю: 3; 5; 7; 10 і 15 т, окремі 20 і 25 т. Вантажопідйомність блочних віброплощадок знаходиться в межах 2...24 т при вантажопідйомності одного уніфікованого блока від 1 до 1,5 т [46].

Основними параметрами вібрації є амплітуда вібропереміщення  $A$  (мм) і частота пульсації  $f$  (Гц), решта параметрів похідні. Для ущільнення бетонних сумішей використовуються віброплощадки в діапазоні частот від 10 до 75 Гц. Проте в більшості випадків використовуються віброплощадки з частотою 25...50 Гц, при амплітуді в межах 0,3...0,6 мм. Стандартним є режим вібрації з параметрами  $f = 50$  Гц та  $A = 0,35$  мм. Основною перевагою стендового віброущільнення є його висока технологічна універсальність за номенклатурою виробів, що формуються.

Застосовується також і поздовжньо-горизонтальне вібрування. Вібраційний вплив в цьому випадку передається на бетонну суміш головним чином через дно і бокові стінки форми, а також через поздовжні натягнуті стержні арматури. Формувальні установки з горизонтальною вібрацією випускаються вантажопідйомністю від 5 до 25 т, частотою коливань 25...50 Гц та амплітудою 0,4...0,8 мм. Горизонтальна вібрація застосовується при формуванні виробів обмеженої довжини і малоефективна для жорстких бетонних сумішей. Тому її ефективно застосовувати сумісно з вертикальною вібрацією, що дає змогу отримати високий ступінь ущільнення бетонної суміші.

Застосовується також формування виробів з поверхневою вібрацією за допомогою віброрейок, віброплит та інших засобів. Для ущільнення монолітних бетонних конструкцій безпосередньо на будівельному майданчику застосовують різного виду глибинні вібратори. При

всіх розглянутих видах вібрації механізм ущільнення бетонної суміші майже не відрізняється, відрізняється тільки устаткуванням. Під час вібрування в бетонній суміші одночасно відбувається два процеси: тиксотропне розрідження цементного тіста і зміна просторової упаковки зерен заповнювачів. Ці процеси взаємопов'язані: перший процес полегшує прояв другого, а другий в свою чергу додатково впливає на перший. Вібрація розглядається не тільки як спосіб механічного ущільнення бетонної суміші, але і як засіб дії на фізико-хімічні процеси, сприяючи активізації коагуляційного ущільнення цементного тіста і гомогенізації бетонної суміші в цілому [46].

Станкове віброущільнення має низку недоліків, одним з яких є неможливість одержати високі фізико-механічні характеристики бетону. У зв'язку з цим, для підвищення фізико-механічних характеристик бетону суміш ущільнюють вібрацією у поєднанні з іншими видами впливу.

За допомогою методу вібропресування можуть бути отримані такі бетонні вироби: стінові камені, багатошарові блоки, бордюрні камені, тротуарна плитка. Цей метод набагато ефективніший від ливарного методу та методу вібролиття отримання бетонних виробів. Одним з позитивних факторів вібропресування є те, що в технології відсутній процес витримки виробів у формах до набору розпалубної міцності. Це дозволяє скоротити час виготовлення виробу, а також площу виробничих підприємств (що особливо важливо для орендованих приміщень), і знизити ціну кінцевого продукту. Якість бетонних виробів, виготовлених за методом об'ємного вібропресування, перевершує якість виробів, вироблених методом лиття. Наприклад, лінійні геометричні розміри готових стінових каменів, вироблених на вібропресувальному обладнанні, мають розбіжності в лінійних геометричних розмірах не більше 1 мм (відповідає ГОСТ 6133-99), у той час як блоки, отримані методом лиття, мають відповідну розбіжність до 5 мм, оскільки касетні форми для лиття не можуть забезпечити належну геометрію виробу. Тротуарна плитка, виготовлена методом лиття, часто не відповідає ГОСТ 17608-91 за показниками міцності на стиск, стирання і морозостійкості. Тільки елементи мощення (тротуарна плитка, бордюрний камінь), отримані методом вібропресування, повністю відповідають вимогам державного стандарту [46].

На ринку вібропресувального обладнання існує широкий вибір професійних пресів як вітчизняного, так і імпортного виробництва часто не доступних за ціною для початківця-виробника будівельних матеріалів. Ці преси характеризуються відмінною якістю одержуваних виробів, надійністю вузлів і високою продуктивністю. Поряд з цим обладнанням на ринку існує вибір аматорських пресів, так званих «несучок». Цей вид обладнання має низьку ціну, в порівнянні з гідравлічними пресами, але якість виробів і надійність устаткування залишають бажати кращого.

Третій вид вібропресувального обладнання – важільні вібропреси. Важільні вібропреси характеризуються відмінною якістю одержуваного виробу при відносно невисокій вартості обладнання. Бетонні вироби, вироблені важільними вібропресами, відповідають стандартам якості за всіма параметрами і ні чим не поступаються виробам, отриманим на професійних гідравлічних вібропресах. Важільні вібропреси прості в експлуатації. Відсутність складних гідроприводів дозволяє уникнути проблем, пов'язаних з масляними станціями і гідроциліндрами. На важільних вібропресах можливий випуск будівельних матеріалів з формувальних сумішей на різних інертних заповнювачах: пісок, шлак, полістирол, тирса.

Одним з важливих факторів виробництва бетонних виробів методом вібропресування є процес приготування формувальної суміші. Для цього використовуються лопатеві змішувачі примусової дії [46].

Впровадження технології виробництва виробів з дрібнозернистих бетонів в першу чергу пов'язано з організацією виробництва у регіонах, де відсутні родовища крупного заповнювача.

Використання дрібнозернистого бетону замість бетону на крупному заповнювачі не тільки підвищує економічну ефективність будівництва, але і дозволяє спростувати технології приготування бетонної суміші і відмовитися від необхідності організації складського та сортувального господарства для прийому, зберігання та переробки крупних заповнювачів.

Вироби з жорстких дрібнозернистих бетонних сумішей при хорошому віброущільненні мають більшу міцність при однаковій витраті цементу, ніж вироби з рухливих бетонних сумішей. Жорстка суміш має менше водоцементне відношення (В/Ц), що дозволяє отримувати вироби підвищеної морозостійкості [1].



Одержання якісного дрібнозернистого бетону багато в чому залежить від правильного підбору складу суміші та догляду за дозріваючим бетоном, при цьому важливо знати як характеристики самих складових суміші, так і технологічні особливості.

Технологія вібропресування дозволяє виконувати розпалублення виробів безпосередньо після формування (негайне розпалублення), при цьому необхідна підвищена жорсткість суміші. Для забезпечення потрібних характеристик доцільно застосовувати пісок середньої або великої крупності. Застосування піску дрібної крупності можливо, але бетонна суміш з таким піском вимагає дуже точного дозування води. При незначному надлишку вологи формовані вироби після розпалублення «попливуть». Саме в цьому і полягає обмеження щодо вибору піску, придатного для отримання виробів з необхідними фізико-механічними характеристиками [46].

Отже, для утворення досить жорсткої просторової структури дрібнозернистого бетону застосування дрібних пісків не доцільне, але застосування суміші з крупного і дрібного піску є оптимальним варіантом у досягненні цієї мети.

Вміст у піску великої кількості дрібних зерен сприяє збільшенню його питомої поверхні, і тоді для з'єднання зерен піску в бетоні потрібно збільшувати витрати цементу.

Крім оптимального підбору зернового складу піску важливим показником при підборі складу жорсткої дрібнозернистої суміші є водопотреба.

Одним з важливих факторів виробництва виробів методом вібропресування є процес приготування формувальної суміші.

Приготування бетонної суміші здійснюються відповідно до вимог ГОСТ 7473-94, ГОСТ 26633-91.

Щоб приготувати якісну формувальну напівсуху суміш, придатну для віброформування, необхідне устаткування, яке забезпечить отримання цих параметрів суміші. Для цього застосовують бетонозмішувачі, які відносяться до типу роторних змішувачів примусової дії з обертовими лопастями і нерухомою чашею. П'ятилопатевий роторний активатор з можливістю регулювання робочого зазору лопаток і вильоту лопастей забезпечує якісне перемішування складових бетонної суміші, не залишаючи не перемішаних ділянок.

Робочий цикл приготування матеріалу на бетонозмішувачах складається з завантаження дозованих матеріалів, перемішування і вивантаження готового замісу бетонної суміші.

Після проведення робіт з підготовки до роботи бетонозмішувача (згідно з технічним паспортом на установку), проводиться завантаження дозованих компонентів в такій послідовності: дрібний заповнювач, цемент, вода.

Вихідні матеріали для бетонної суміші дозують ваговими дозаторами, причому похибка дозування не повинна перевищувати для піску  $\pm 2\%$  і  $\pm 1\%$  для цементу та води. Дозування води здійснюється об'ємним дозатором. Для бетонозмішувальних установок потужністю до  $5 \text{ м}^3/\text{год}$  допускається об'ємне дозування сипких матеріалів з тими ж похибками дозування.

Для виключення грудкування, а також для скорочення часу початкового змішування, необхідно подавати компоненти бетонної суміші при працюючому активаторі змішувача. У разі налипання цементу на стінки ємності змішувача та збільшення часу змішування необхідно знизити швидкість подачі цементу в ємність змішувача.

Рекомендована ГОСТом 7473-94 тривалість перемішування бетонної суміші (час від моменту закінчення завантаження всіх матеріалів у працюючий змішувач до початку вивантаження готової суміші) – не менше 50 с.

Готова бетонна суміш через вузол розвантаження змішувача подається на пост формування виробів.

Перед формуванням виробів для уточнення правильності відкоригованого складу суміші рекомендується визначити рухливість бетонної суміші у відповідності до вищеописаної методики не рідше одного разу на зміну протягом 15 хв. після вивантаження суміші із змішувача.

Процес формування дозволяє забезпечити отримання виробів заданих розмірів і форми. У процесі вібраційного впливу за рахунок зближення зерен заповнювача, зчеплення міжзернового простору цементним тістом, видалення бульбашок повітря створюється більш щільна структура бетонної суміші.

Вироби, вироблені важільними вібропресами, відповідають стандартам якості за всіма параметрами і ні чим не поступаються виробам, отриманим на гідравлічних вібропресах.

Готова бетонна суміш подається в приймальний бункер преса, опускається пуансон і відбувається вібропресування виробу. Час попередньої вібрації складає 2...3 с, остаточний – встановлюється дослідним шляхом.

Відформовані вироби на піддонах витримуються при температурі 20 °С і відносній вологості повітря 90...95 % протягом 12...14 годин [46].

Переваги отримання виробів за технологією об'ємного вібропресування:

- використання в основному місцевих матеріалів: кварцовий пісок, відходи промисловості (шлак, цегельний бій та ін.), теплоенергетики (паливні шлаки та золи) та ін.;

- вібропреси різних модифікацій здатні до швидкого переналагодження при переході на виробництво виробів іншої номенклатури;

- отримання бетонних виробів з потрібними фізико-механічними та експлуатаційними характеристиками (міцністю, морозостійкістю, водопоглинанням та ін.), з точними геометричними параметрами, високою архітектурною виразністю.

Суттєвий вклад з розвиток теорії вібропресування бетонних сумішей внесли роботи А. В. Саталкіна, В. В. Михайлова, М. Г. Елбакідзе, І. Н. Ахвердова.

Вібровакуумування бетонних сумішей характеризується поєднанням процесів періодичного вакуумування з вібруванням. Вібрування здійснюється для укладання і ущільнення бетонної суміші, а далі вже в процесі вакуумування сформованого виробу вібрація включається на досить короткий термін для того, щоб локалізувати тертя між частинками суміші, сприяти кращому заповненню пор твердими її компонентами. Величина вакуумного розрідження складає 75...80 % від абсолютного. У результаті утворюється градієнт тиску, під дією якого надмірна вода, повітря і пароповітряна суміш направляються із зон з атмосферним тиском до вакуум-джерела і видаляються із бетону.

Вібровакуумна технологія виробництва монолітних бетонних підлог і основ передбачає обробку віброрейкою і вакуумуванням бетонної суміші, що дає можливість на третю добу виконувати подальші технологічні операції [46].

Віброударний режим коливань є різновидом багаточастотного вібрування. Він має низку переваг, які забезпечують його широке розпо-

всюдження. В цьому способі за допомогою вібрації досягається мінімально необхідне розрихлення бетонної суміші, а низькочастотні удари великої амплітуди забезпечують ефективне ущільнення бетонної суміші. Додатковими параметрами ущільнення при віброударному режимі є періодичність сили удару. Все це дозволяє використовувати віброударний спосіб для ущільнення бетонних сумішей підвищеної жорсткості з одночасним поліпшенням якості виробу. Застосовуючи цей спосіб, можна формувати вироби складної конфігурації з прорізами, електроканалами, конусами, різними вставками та іншими елементами.

Огляд досліджень в області виробництва збірного залізобетону показує, що існуючі формувальні устаткування і методи ущільнення переважно базуються на використанні вібраційних режимів з гармонічною формою динамічної дії. У низці випадків ці режими не забезпечують здобуття щільних і однорідних структур та високої якості поверхонь.

Дослідження впливу гармонічних форм коливань на процес ущільнення показало, що за кожен період коливального руху сили інерції створюють стискові напруження суміші, підсилюючи корисний ефект зближення часток. За іншу частину періоду сили інерції створюють напруження розтягу суміші і можуть сприяти, за певних умов, ущільненню і циркуляційному перемішуванню. Враховуючи частину роботи сили, яка створює стискові напруження, було визначено перевагу віброударних і імпульсних режимів, потужність динамічної дії яких в кілька разів вища, ніж при гармонічних формах коливань [45].

Характерною особливістю віброформувального устаткування є передача енергії коливань ущільнювальній суміші через формотворні елементи, що призводить до різкого зниження коефіцієнта корисної дії установок, швидкого зносу устаткування, порушення геометричних розмірів виробів, підвищення трудомісткості ремонтних і відновних робіт. Відомо, що вага віброуючих частин по відношенню до корисного об'єму бетону складає  $1/10 \dots 1/4$ , а загальні втрати досягають 80...95 % споживаної потужності [47, 48]. Значна віброуюча поверхня елементів бортового оснащення створює високі рівні звукового тиску, що значно перевищують нормативні значення [49–52].

Тому в наш час намітилася тенденція переходу на режими ущільнення із зниженою частотою коливань, віброударні, режими з горизонтально направленими коливаннями [45, 53–55].

Широко використовуються установки резонансної дії з нелінійною формою коливань, методи динамічного пресування [56–59]. Цікавим є імпульсний метод ущільнення бетонних сумішей, що полягає в передачі рівномірно по поперечному перерізу виробу імпульсів у вигляді короткочасно прикладеного тиску [60, 61].

Процес ущільнення під дією пульсації включає три стадії. У початковий момент структура свіжоукладеної суміші руйнується під дією коливань з вертикальними і горизонтальними складовими. Відбувається перерозподіл суміші по площі виробу, знижуються сили сухого тертя між частинками, зменшується об'єм затисненого повітря. При подальшій дії пульсації спостерігається перехід суміші в стан реології, при якому починають проявлятися, разом з сухим тертям в'язкі властивості.

Імпульси прикладаються до бетону на межі розділу з формою пульсаторами, які кожного разу зміщуються на деяку величину. Частота імпульсів знаходиться в межах 10...30 Гц. Імпульси діють на бетонну суміш по черзі із зсувом по фазі на  $180^\circ$  без залучення до коливального процесу форми оснащення. Це спричиняє полічастотні коливання суміші з наявністю декількох гармонік, створює умови для швидкого тиксотропного розрідження бетонної суміші і здобуття високої щільності виробу. Імпульсний метод забезпечує зниження рівня шуму і шкідливої дії коливань робочих місць в порівнянні із звичайною вібрацією. Дані лабораторних досліджень і заводських випробувань показують, що при імпульсному ущільненні зниження енергоємності досягається в 4–5 разів в порівнянні з ущільненням виробів на вібромайданчиках і складає 3,5...4 кВт/м<sup>3</sup>. Імпульсне формування довгомірних виробів з подачею імпульсів знизу розробив професор А. А. Афанасьєв [62–64].

Безпосередня передача енергії пульсації бетонної суміші здійснювалася з використанням установок диско-роликового типу [65, 66]. Простота і надійність конструктивного рішення робить такий тип генераторів імпульсів найбільш прийнятним у виробництві довгомірних виробів.

Як джерело коливань використовувалися ролики, розташовані в спеціальних дисках. В процесі обертання ролики здійснюють ударну взаємодію з еластичним килимом днища і створюють в бетонній суміші періодичні імпульси з частотою, кратною кількості роликів в диску і

швидкості обертання валу. Розташування дисків по довжині пристрою із зрушенням по фазі створює ефект зміщеної пульсації.

Для сумішей з осіданням конуса 0...4 см оптимальною є частота в межах 15...20 Гц, для жорсткіших сумішей частоту треба збільшувати до 25...30 Гц. Це забезпечує рівномірне ущільнення виробів висотою до 2 м за 1,5...2,5 хвилини обробки [65, 66].

Доцільним є також використання імпульсного ущільнення у виробництві плоских і об'ємних елементів у вертикальному положенні з подачею імпульсів знизу, не включаючи в коливальний процес елементи форми оснащення [66]. До таких виробів відносяться елементи збірної елеваторобудування, внутрішні перегородки багатоповерхових каркасних будівель та інші.

За даними [61, 66] встановлено, що зона дії кожного пульсатора, тип збуджуваних хвиль і області ефективного ущільнення багато в чому залежать від конфігурації і площі пульсаторів. Так, для пульсаторів розмірами 50×100 мм зона дії складає  $L = 80...90$  см; при перерізі 100×150 мм:  $L = 200$  см; при перерізі 100×200 мм:  $L = 250...280$  см і так далі. Рациональні режими пульсації лежать в межах 15...20 Гц. З підвищенням жорсткості суміші частота і амплітуда пульсації повинні підвищуватися.

Висота формованих виробів – до 3,2 м, вироби відрізняються високою якістю зовнішніх поверхонь і однорідністю бетону, що оцінюється коефіцієнтами варіації за міцністю в межах 1,5...6 %.

У ВНТУ розроблений новий метод ущільнення бетону за допомогою імпульс-пресування [67].

Суть методу полягає в дії на бетонну суміш пресувального тиску, який спочатку піднімають до заданої величини в перебігу декількох секунд, а потім здійснюють пульсуючу його зміну з частотою  $f = 0,5$  Гц і амплітудою  $A_p = 30$  % від свого максимального первинного значення.

Рациональними параметрами режиму пресування є пульсуючий режим при максимальному тиску 2,5 МПа і часі пресування 30 с, при цьому мінімальне значення пресувального тиску в будь-якій точці ущільнювальної бетонної суміші має бути не менше 1,0 МПа.

Імпульс-пресування дозволяє різко зменшити тертя між частинками дисперсного середовища, сприяє швидкому руйнуванню «містків» зерен заповнювача, що заклинилися, і подоланню їх контактної пруж-

ності. Тим самим досягається щільна упаковка складових бетонної суміші в одиниці об'єму, збільшується поверхня зіткнення між компонентами. В результаті отримують бетон з високими фізико-механічними властивостями.

Встановлено, що міцність імпульс-прес-бетону при стиску в порівнянні з міцністю бетону, отриманого статичним пресуванням, збільшується в 1,14...1,44 рази, а в порівнянні з бетоном, ущільненим на віброплощині в стандартному режимі, – в 1,71 рази.

Із зарубіжних вібраційних способів формування залізобетонних виробів заслуговує на увагу спосіб «Шок-бетон». Його застосовують при виробництві залізобетонних виробів в Голландії, Англії, США, Австрії, Японії, Франції. Основна перевага методу «Шок-бетон» – можливість здобуття виробів з чистими лицьовими поверхнями. Суть методу полягає в тому, що форма оснащення з бетонною сумішшю всередині падає, ударяючись об станину. Фірма «Schokbeton» (США) виготовляє цим способом великорозмірні конструкції, до яких пред'являються підвищені вимоги. Для цих цілей застосовуються малорухливі суміші, ущільнені при частоті коливань 4 Гц і при амплітуді 3 мм.

Таким чином, складний процес вібраційного формування характеризується необхідністю подолання сил тертя, зчеплення і в'язкого опору. В цьому випадку кінцевий стан бетонної суміші залежить від:

- зближення крупних і дрібних частинок заповнювачів, що досягається подоланням взаємних сил тертя і зчеплення між частинками;
- перерозподіл цементного тіста, тиксотропне розрідження суміші для досягнення потрібного ущільнення.

Безумовно, ці сторони одного і того ж процесу треба розглядати в комплексі. Сили пластичного і в'язкого опору перешкоджають процесу ущільнення, але їхній фізичний зміст різний. Сили в'язкого опору зменшують вплив сил сухого тертя – цементне тісто виконує роль змазки в процесах ущільнення. Ця обставина і визначила вивчення сил в'язкого опору і зниження їх значення при вібраційному впливі.

При низькочастотних режимах відбувається менш інтенсивне розрідження розчину. З іншого боку високі амплітуди сприяють швидкому переміщенню частинок і загальний процес ущільнення буде менш тривалим.

Ущільнення функціонально залежить від прискорення, яке прийнято в якості одного з основних факторів, що визначають цей процес. Чим менше значення прискорення в області раціональних частот і амплітуд, тим вищий ефект ущільнення і оптимізація вібраційної системи.

### **1.3 Основи проектування складу бетонної суміші**

Проектування складу бетонної суміші – ключове питання бетонознавства, вирішення якого визначає рівень експлуатаційної надійності конструкцій і споруд, а також міру раціонального використання ресурсів, що необхідні для виготовлення і зведення.

Основоположником практичної методології проектування складу бетону є вчений Д. Абрамс, який узагальнивши результати експериментальних досліджень в лабораторії Чикаго «Portlandcement Association», сформулював основні завдання проектування складів бетону і методи їх вирішення. За Абрамсом: проектування складу бетону полягає у «виборі водоцементного чинника, відповідного заданій міцності і умовам роботи споруд, і знаходженні такої комбінації заповнювачів, яка могла б утворити бетон необхідної якості і придатної консистенції». При цьому має бути забезпечена найменша витрата засобів на виготовлення бетону і його укладання.

Сформульовані на початку розвитку технології бетону завдання проектування складів бетонних сумішей залишаються актуальними і в наш час.

У сучасній технології під проектуванням складу бетону розуміють обґрунтування, вибір вихідних матеріалів і їх співвідношень, що забезпечують при заданому критерії оптимальності нормовані проектні вимоги до бетонної суміші і бетону. При використанні методології системного підходу проектування складів бетону може включати низку додаткових завдань, пов'язаних з оптимізацією технологічних параметрів виробництва і проектних вимог [68].

Д. Абрамс вперше запропонував два методи проектування складу бетону: «пробний метод», або експериментальний підбір, і метод попередніх обрахунків. Як показала практика, обидва методи мають право на існування і розвиток.

Розвиток бетонознавства, комп'ютеризація технологічних і техніко-економічних розрахунків відкрили нові можливості для розвитку



розрахункового методу проектування складу бетону. Розрахунок складу бетонних сумішей вимагає експериментального уточнення до їх виробничого застосування, проте використання розрахункового методу виявляється доцільним, особливо при необхідності оперативного обґрунтування потреби ресурсів і ефективності вихідних матеріалів, зниження трудомісткості лабораторних робіт. Обидва вказані методи проектування складу, як вважав Абрамс, мають базуватися на правилі водоцементного відношення. Подальші дослідження показали, що твердження Абрамса про те, що «міцність бетону при даних матеріалах і умовах їх обробки визначається єдиним відношенням об'єму води до об'єму цементу» є деяким перебільшенням і слово «єдиним» краще замінити на слово «в основному». У низці робіт, зокрема, показаний істотний вплив на міцність важкого бетону при даних вихідних матеріалах разом з В/Ц, що характеризує якість цементного клею, його об'ємної концентрації і інших чинників.

На практиці проектування складу бетону здійснюється на базі достатньо великої кількості методів, заснованих на різних теоретичних і технологічних передумовах. Як показав час, прагнення узагальнити методологію проектування складу і дискусія про перевагу одних методів над іншими виявилися неконструктивними [68].

Актуальними напрямками розвитку методології проектування складу бетону є:

1. збільшення «роздільної здатності» розрахункових методик, тобто можливості більш повного обліку технологічних чинників і проектних вимог до бетону;
2. підвищення ефективності алгоритмів розрахункових методик, їх точності і швидкодії.

Розвиток цих напрямів можливий за рахунок реалізації сучасних уявлень бетонознавства про формування будівельно-технічних властивостей бетону у поєднанні з системним аналізом.

Найбільш загальний підхід до проектування складу бетону заснований на кількісному обліку взаємозв'язків типу властивість-структура-склад бетону шляхом аналізу і спільного розв'язання рівнянь, що зв'язують показники властивостей бетону з параметрами його структури.

Основними передумовами такого підходу можна вважати такі положення бетонознавства:

1. Більшість властивостей бетону є функціями його структури. Залежно від характеру тих або інших властивостей їх можуть формувати переважно макро- або мікроструктурні особливості бетону. Вплив на властивості бетону його структури зумовлює взаємозалежність різних властивостей.

2. Кожна з властивостей бетону однозначно пов'язана з відповідними параметрами або критеріями структури, які враховують якісні і кількісні особливості його твердої фази і порового простору. Як для типового композиційного матеріалу структурні параметри бетону враховують особливості його матриці (цементного каменя) і заповнювачів, їх взаємодію.

3. Напрями зміни різних властивостей бетону при зміні параметрів структури і чинників складу можуть як збігатися, так і бути різними. Проектування складу бетону із заданими властивостями вимагає обліку їх спрямованості і у багатьох випадках є завданням компромісним.

Оптимальна структура бетону – це структура, яка забезпечує комплекс необхідних властивостей при виконанні заданих умов оптимальності (мінімальна витрата цементу, мінімальна вартість бетонної суміші та ін.). Відповідно до цієї умови складу бетону можуть істотно відрізнитися за різних умов оптимальності.

У будівельно-технологічній практиці найбільшого поширення набули методи проектування складу бетону з необхідною міцністю при стиску. Це обумовлено, по-перше, тим, що при конструктивних розрахунках міцність бетону є основним його параметром, і, по-друге, припущенням, що з міцністю однозначно зв'язані і інші необхідні властивості бетону. Останнє припущення, проте, не є досить загальним. Дійсно, з міцністю бетону при стиску однозначно пов'язано багато його властивостей: міцність при вигині, розтягу, зносостійкість, стійкість до кавітації та ін. Проте не є однозначними залежності міцності і морозостійкості, міцності і повзучості, їх розрахункове визначення має бути засноване на використанні комплексу спеціальних кількісних залежностей [68].

Проектування складу бетону може розглядатися як ізольована система (перший тип завдань) і як підсистема загальних технологічних систем, наприклад, проектування бетонних, каменебетонних конструкцій і технологія їх виробництва (другий тип завдань). У першому випадку завдання полягає лише в оптимальному рецептурному забезпеченні заданих параметрів, а в другому – додатково вирішується завдання оптимізації самих параметрів (легкоукладність суміші, міцність бетону та ін.).

Існуюча практика передбачає, в основному, вирішення завдань першого типу, що не завжди може виявитися достатнім. Наприклад, прагнення технологів досягти максимальної економії цементу при проектуванні бетону заданої міцності не є продуктивним, якщо сам показник міцності не оптимальний по відношенню до вартості конструкцій. Зокрема, використання бетону підвищеної міцності може дозволити зменшити перетин конструкцій і, таким чином, з позицій витрати цементу на одиницю виробів (конструкцій), а не на кубометр бетону, може виявитися вигіднішим. Аналогічно, не завжди техніко-економічно обґрунтованими є показники легкоукладності бетонних сумішей, від яких істотно залежить склад. Наприклад, якщо критерієм оптимізації складу є вартість конструкції, використання жорсткої бетонної суміші може виявитися менш вигідним, враховуючи трудовитрати на укладання бетону, ніж використання литої суміші, хоча остання містить більшу кількість цементу. У зв'язку з цим представляється раціональним, там де це можливо, об'єднувати зусилля конструкторів, технологів і економістів для комплексного вирішення завдань конструктивного і технологічного проектування бетону [68].

При проектуванні складу бетону в завданнях другого типу передбачається їх багатоваріантність. Вибір того або іншого складу визначають в конкретних умовах, виходячи з прийнятого критерію оптимальності. Такими критеріями найчастіше можуть бути мінімальна витрата цементу, мінімальна середня щільність бетону, мінімальна вартість бетону. Може бути вибраний складніший критерій, наприклад, вартість конструкцій або навіть всієї споруди в цілому з обліком не лише вартості бетону, але і трудомісткості, вартості виготовлення, перевезення і монтажу конструкцій.

У завданнях другого типу як чинники складу бетонної суміші, що оптимізуються, розглядаються не лише рецептурні (співвідношення заповнювачів, витрата добавки до бетону), але також технологічні і конструктивні параметри.

Одним з підходів, що зв'язують склад бетонної суміші з технологічним процесом, є теоретичний підхід, розроблений вченим Ю. Сторком. Він запропонував розглядати енергію ущільнення бетонної суміші при вібрації як один з основних параметрів складу суміші, що забезпечує в комплексі з іншими чинниками, необхідну міцність бетону. Виходячи з цієї передумови, Сторк вивів ряд рівнянь, що встановлюють залежність між режимом вібрації, складом і фізико-механічними властивостями бетонних сумішей і бетонів [69].

У низці робіт отримано рівняння, що зв'язують склад бетону з режимом теплової обробки, і розглянуто їх розв'язання при різних критеріях оптимальності.

Завдання першого типу можна розділити на групи: одно-, дво- і багатопараметричні. В основу такої класифікації покладена загальна кількість нормованих параметрів для бетонної суміші і затверділого бетону.

Для однопараметричних завдань не нормується зазвичай в строго певних кількісних межах показник легкоукладності суміші. Вказується лише його якісна характеристика (суміш напівсуха, жорстка, рухлива, лита). Якісно можуть характеризуватися і окремі показники затверділого бетону (бетон морозостійкий, водонепроникний, сульфатостійкий та ін.). У низці випадків вказується спосіб виготовлення виробів або виконання бетонних робіт. Можуть вказуватися також умови експлуатації конструкцій. У тих випадках, коли це представляється можливим, технолог вводить в умову завдання проектування складу кількісні показники, адекватні якісним оцінкам, і однопараметричне завдання проектування складу трансформується в дво- або багатопараметричне. У останніх випадках доводиться, проектуючи склад, що забезпечує нормовані властивості, вводити необхідні обмеження по витраті води, В/Ц, величині і вигляду заповнювачів, вмісту добавки.

Найбільш розробленими і такими, що реалізуються на практиці, є двопараметричні завдання, коли нормованою властивістю бето-

ну є його міцність при стиску ( $R_{cm}$ ), а бетонної суміші – показник легкоукладності (рухливість або жорсткість). Для вирішення завдань цього типу широко застосовуються розрахунково-експериментальні методи, що використовують низку відомих технологічних залежностей: міцності бетону від В/Ц, правило постійності водопотреби бетонних сумішей, правило оптимального вмісту піску та ін. [68].

При вирішенні таких завдань для важких бетонів послідовно визначають значення водо-цементного відношення, витрату води з врахуванням необхідної рухливості або жорсткості бетонної суміші і витрату заповнювачів, використовуючи припущення про те, що бетонна суміш складається з абсолютних об'ємів всіх її складових. У простому випадку для чотирикомпонентної суміші необхідні показники трьох параметрів: водо-цементного відношення (В/Ц), витрати води (В) і чинника, що характеризує співвідношення заповнювачів (частку піску в суміші заповнювачів ( $r$ ) або коефіцієнта розсунення зерен крупного заповнювача цементно-піщаним розчином ( $\alpha$ )). Останній чинник можна розглядати як оптимізуючий, оскільки лише при деякому оптимальному його значенні в умовах В/Ц = const можливе досягнення мінімальної витрати цементу. Найчастіше під оптимальним приймають співвідношення заповнювачів, що забезпечує їх найкращу легкоукладність або мінімальну водопотребу.

Для низки завдань проектування складу бетону (наприклад, легких бетонів) В/Ц не є визначальним чинником, що забезпечує комплекс нормованих властивостей. Для таких завдань слід знаходити інший, істотний для всіх нормованих властивостей чинник. Визначення необхідного значення цього чинника стає головним завданням розрахунку складу.

Розробка досить загального і доступного розрахунково-експериментального методу проектування складів бетонних сумішей із заданою легкоукладністю і міцністю бетону стала можливою завдяки використанню низки припущень, отриманих на основі фізичних закономірностей, обумовлених впливом структури бетону на його властивості. Такими закономірностями є правило водоцементного відношення, правило постійності водопотреби бетонних сумішей, правило оптимального вмісту піску та ін. Ці закономірності можуть бути використані і при багатопараметричному проектуванні складу бетону [68]. При цьому загальна схема методу така:

1. З врахуванням проектних вимог до бетону, технологічних умов і техніко-економічного аналізу визначаються вихідні компоненти бетонної суміші і її легкоукладність.

2. У тих випадках, коли нормуються властивості бетону, однозначно пов'язані з міцністю бетону при стиску  $R_{ст}$  (міцність при розтягу, вигині, модуль пружності та ін.), визначається значення останньої, що забезпечує задані властивості.

3. З врахуванням активності цементу, якісних особливостей заповнювачів, умов тверднення і інших чинників визначається В/Ц, що забезпечує задані властивості.

4. Для досягнення необхідного показника легкоукладності і при необхідності інших властивостей бетонної суміші і бетону при використанні даних вихідних матеріалів і домішок, визначається витрата води (В). При цьому в разі виходу за межі правила постійності водопотреби витрата води корегується з врахуванням значення В/Ц.

5. При нормуванні морозостійкості бетону розраховується необхідний об'єм емульсованого повітря і уточнюється необхідне значення В/Ц.

6. При отриманих значеннях В і В/Ц перевіряється можливість досягнення нормованих властивостей, які визначаються цими двома технологічними параметрами. У випадку недосягнення нормованих властивостей виконується додаткове корегування значень В і В/Ц з використанням, при необхідності, спеціальних технологічних прийомів (введення домішок та ін.).

7. Розраховується з врахуванням остаточно знайдених значень В/Ц і В витрата цементу і перевіряється виконання обмежень, пов'язаних з витратою цементу (тепловиділення, стійкість до корозії та ін.).

8. Розраховується склад дрібного і крупного заповнювача при введенні декількох фракцій, а потім їх витрати. При виборі співвідношення заповнювачів разом з досягненням найкращої легкоукладності і міцності беруться до уваги і інші умови (підвищена водостійкість, товщина конструкції, міра армування та ін.).

9. Розглядається можливість використання різних технологічних рішень, направлених на економію цементу, зниження енерговитрат, зменшення вартості бетонної суміші та ін.

## 1.4 Висновки

1. Способи роздільного бетонування конструкцій розділяють на дві групи:

– ґрунтуються на введенні крупного заповнювача в рухливу цементно-піщану суміш, попередньо залиту в форму;

– передбачають укладання у форму крупного заповнювача з подальшим заповненням його міжзернового простору цементно-піщаним розчином.

2. При проникненні кам'яної накидки в бетонну суміш у кількості 20...25 % від загального об'єму бетону знижується витрата цементу до 210...224 кг на 1 м<sup>3</sup> бетону при одночасному збереженні проектної марки бетону. При більш високому вмісті каменю відповідно знижується витрата цементу.

3. Роздільне бетонування має такі переваги:

– бетони мають міцність на стиск більш високу в ранньому віці;

– можливість підвищення крупності зерен крупного заповнювача, оскільки при роздільному бетонуванні крупний заповнювач не наплавляють в змішувачі, придатні для перемішування зерен обмеженої крупності, а також тому, що виключається небезпека погіршення якості бетону через розшарування бетонної суміші при транспортуванні;

– підвищення крупності заповнювача приводить до економії цементу, а також дозволяє знизити вартість, оскільки витрати на подрібнення зменшуються;

– полегшуються роботи в районах з дуже жарким кліматом, коли необхідно швидко використовувати розчин після його приготування. Від моменту приготування розчину до його укладання може пройти лише кілька хвилин;

– наявність двох незалежних потоків матеріалів і можливість будь-якого розриву в часі між укладанням крупного заповнювача і подачею розчину забезпечує більш гнучку організацію робіт та підвищений темп укладання;

– зменшується порожнистість крупного заповнювача при використанні двох фракцій заповнювача.

4. Спосіб об'ємного вібропресування має такі переваги формування виробів:

– використання в основному місцевих матеріалів: кварцовий пісок, відходи промисловості (шлак, цегельний бій та ін.), теплоенергетики (паливні шлаки та золи) та ін.;

– застосування вібропресів різних модифікацій, які здатні до швидкого переналагодження при переході на виробництво виробів іншої номенклатури;

– отримання бетонних виробів з потрібними фізико-механічними та експлуатаційними характеристиками (міцністю, морозостійкістю, водопоглинанням та ін.), з точними геометричними параметрами, високою архітектурною виразністю.

5. Існуючі формувальні устаткування і методи ущільнення переважно базуються на використанні вібраційних режимів з гармонічною формою динамічної дії та не завжди забезпечують одержання щільних і однорідних структур, високої якості поверхонь. Тому відбувся перехід на режими ущільнення із зниженою частотою коливань, віброударні, режими з горизонтально направленими коливаннями: установки резонансної дії з нелінійною формою коливань, методи динамічного пресування, імпульсний метод ущільнення бетонних сумішей, метод імпульс-пресування.

6. Міцність імпульс-прес-бетону при стиску в порівнянні з міцністю бетону, отриманого статичним пресуванням, збільшується в 1,14...1,44 рази, а в порівнянні з бетоном, ущільненим на віброплощадці за стандартного режиму в 1,71 рази.

7. Розробка досить загального і доступного розрахунково-експериментального методу проектування складів бетонних сумішей із заданою легкоукладністю і міцністю бетону стала можливою завдяки використанню низки припущень, зроблених на основі фізичних закономірностей, обумовлених впливом структури бетону на його властивості. Такими закономірностями є правило водоцементного відношення, правило постійності водопотреби бетонних сумішей, правило оптимального вмісту піску та ін. Ці закономірності можуть бути використані і при багатопараметричному проектуванні складу бетону.