

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра будівництва та професійної освіти

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

на тему: **«Дослідження зростання міцності бетону в
процесі його твердіння»**

КРМ.192 БЦмд_21 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти
за освітньо-професійною програмою
«Технології будівельних конструкцій,
виробів і матеріалів» спеціальності 192
«Будівництво та цивільна інженерія»
ступеня вищої освіти магістр групи
192БЦмд_21

Ткаченко Юрій Володимирович

Керівник: Бондар Л.В.

Полтава 2024 року

ВСТУП

Бетон, володіючи багатьма перевагами, має також великий недолік - він твердіє не так швидко, як це необхідно для деяких технологічних процесів інтенсивного будівництва.

Якщо при будівництві із монолітного бетону вимушені миритися зі значним строком зачехлення бетону в опалубці, то для бетонних заводів це небажано, так як вимагає великої кількості форм і великих виробничих площ.

Відомо, що розпалубочна міцність бетону повинна бути такою, щоб після видалення опалубки бетон міг витримувати виникаючі напруження.

Бетон повинен мати міцність, яка гарантує можливість розпалубки виробів, їх підняття, транспортування в межах підприємства на склад.

Розпалубочна міцність повинна бути, з одного боку, як можливо нижче, з іншого - достатньо високою, щоб гарантувати безпечність роботи з виробами. У випадку, наприклад, підняття виробів на монтажних петлях, міцність бетону повинна бути достатньою.

Якщо вироби підлягають монтажу без проміжного зберігання на складі, то відпускна міцність повинна відповідати монтажній міцності, що вимагається для даного будівництва.

Тому одним із основних параметрів при виготовленні бетону є його розпалубочна міцність. В результаті, виникає задача визначення у кожному випадку розпалубочної міцності бетону.

На практиці дана задача вирішується взяттям проб статистичною обробкою їх даних, що вимагає затрат часу і додаткових витрат.

Тому, тема дипломної роботи, яка направлена на розробку математичної моделі зростання міцності бетону в процесі твердіння є актуальною і дозволяє теоретично встановити міцність на будь-якому відрізку часу під час твердіння.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Процес структуроутворення бетону

Формування структури бетону - складний фізико-хімічний процес, який розвивається в часі. Кінетика структуроутворення і перетворення бетонної суміші в тверде тіло - штучний конгломерат-визначається багатьма технологічними і фізичними факторами. Тому прогнозування параметрів кінцевого стану бетону, коли в основному завершені процеси структуроутворення завжди являє собою складну задачу.

Залежно від технологічних і фізичних факторів змінюється не тільки кінетика процесів структуроутворення, а й кінцевий результат цього процесу - параметри структури і фізико-механічні властивості бетону.

Тому вирішення проблеми отримання бетону із заданими високими фізико-механічними властивостями пов'язано насамперед зі створенням таких умов, коли процесом структуроутворення можна ефективно управляти. У цьому полягає головна мета технології, і для її досягнення необхідно глибоко зникнути в суть явищ, що відбуваються в твердінні бетону, встановити їх роль і значення в формуванні структури бетону, як на мікро-, так і на макрорівні.

Основну структуроутворюючу роль в бетоні виконує тверднуче цементне тісто, а потім цементний камінь, що створює в щільному бетоні як би безперервну матрицю з включеннями дрібного і крупного заповнювача.

У початковий період після замішування в'язучого утворюється первинна система зерен цементу з проміжками, заповненими водою, - цементне тісто. У свою чергу цементне тісто в бетонній суміші заповнює простір між зернами заповнювача, будучи активною частиною структури вже на ранній стадії. Основну структуроутворюючу роль цементне тісто, а потім цементний камінь, зберігають на всіх стадіях структуроутворення бетону.

Фізико-хімічні процеси і явища, що відбуваються при взаємодії мінералів портландцементу та інших в'язучих з водою досить докладно розглянуті в курсі «Мінеральні в'язучі речовини». При замішуванні цементу водою в результаті процесів гідролізу і гідратації виникають мікроструктури твердіння, характер і властивості яких змінюються в часі. Ці структури утворюються в прошарках між частинками цементу, спочатку заповненими водою, як результат зв'язку між новоутвореннями гідратів мінералів клінкеру. П.А. Ребіндер за характером цих зв'язків розділяє структури твердіння на коагуляційний, умовно-коагуляційний і кристалізаційно-конденсаційні. Ці структури і характеризують основні стадії розвитку процесу твердіння структуроутворення цементного кам'яно.

Коагуляційні структури утворюються, в основному, за рахунок енергії міжмолекулярного тяжіння при підвищенні концентрації новоутворення, переважно гідросилікатів і гідроалюмінатів кальцію в початковій підготовчій стадії структуроутворення. Ці гідрати представлені у вигляді найдрібніших масинок - субмікрочисталив - з розмірами менше 0,1 мкм; вони утворюють прошарок між гідратованими зернами цементу колоїдну систему - зоберморитовий гель. Між частинками виникають коагуляційні контакти, що і призводить до утворення коагуляційної структури. Особливістю цих контактів є обов'язкова наявність між частинками тонкого стійкого прошарку води (дисперсного середовища).

Відмінними рисами коагуляційних структур, зумовлених характером контакту між частинками є:

- оборотність або тиксотропія - здатність мимовільно неодноразово відновлюватися через деякий час після руйнування;
- висока еластичність; під впливом напруги структура здатна до значних деформацій без розривів і тріщин, що обумовлено можливістю переміщення і повороту частинок один відносно іншого завдяки даного прошарку в точкових контактах частинок.

Тривалість існування коагуляційної структури в чистому вигляді відносно невелика. У цей період цементне тісто складається з прореагувавших частинок цементу і гелеподібної маси набуває властивість структурованої системи, що володіє деякою пластичною міцністю і біологічними властивостями пластичного тіла, граничним опором зсуву і структурною в'язкістю. Однак на стадії коагуляційної структури зв'язки між елементами досить слабкі та податливі. У цей період відбувається загустіння (схоплювання) цементного тіста.

Умовно-коагуляційні структури виникають у міру збільшення ступеня перетворення вихідної фази (часток цементу) в гідратні новоутворення. Для цих структур характерна відсутність між контактуючими частинками гідратів водних прошарків. Умовно-коагуляційні структури утворюються в результаті переплетення частинок видовженої форми у вигляді повсті (волоку).

Кристалізаційно-конденсаційні структури є контакти прямого зрощення кристалів відповідних гідратів. Ці принципово нові види зв'язку надають структурі якісно нові механічні властивості. На відміну від коагуляційної переглянутої структури під впливом напружень деформуються і руйнуються незворотно, мимоволі не відновлюються. Тому механічні дії (наприклад вібрування) на цій стадії з метою вдосконалення структури не тільки не приносять користі, а й шкідливі.

Кристалізаційні контакти утворюють середній жорсткий каркас, сприяють різкому збільшенню міцності матеріалів; в'язкопластичне деформування переходить в пружньокохлике руйнування. Підвищенню міцності сприяють зростання числа контактів прямого зрощення, збільшення об'ємної концентрації новоутворень і щільності гелю в просторі між частками цементу.

Разом з тим поява і розвиток кристалічного каркаса викликає внутрішню напругу в твердій системі. Відбувається так зване «старіння» гелю - укрупнення частинок і зменшення кількості контактів і зниження

міцності всієї системи. У мікроструктурі виникають дефекти, тріщини розриву суцільності і т.п. Одночасно, завдяки наявності коагуляційних контактів, протікають і релаксаційні процеси, що знижує внутрішній напружений стан. Тому стадія зміцнення структури проходить в умовах одночасного впливу конструктивних і деструктивних чинників. Особливо гостра боротьба цих впливів має місце при підвищенні температури середовища, коли розглядаються процеси інтенсифікації. Структура зміцнюється нерівномірно, спостерігається спади міцності. Подальший розвиток структури цементного каменю полягає в основному в поступовому ущільненні телю і збільшення обсягу кристалічної складової - відбувається повільне і тривале наростання міцності.

Таким чином, увесь процес структуроутворення цементного каменю і бетону можна умовно розділити на 2 основних періоди. 1) формування структури і 2) період її зміцнення (стабілізації). У кожному періоді, в свою чергу, можна виділити дві стадії: перший період - підготовча стадія і стадія утворення структурованої системи; другий період - стадія утворення кристалічного каркаса і його розвитку стадія тривалого наростання міцності структури. Природно, чітких меж між періодами і стадіями не існує, їх можна встановити тільки за ознаками, що свідчать про те, що одні процеси в даний момент переважають над іншими. Проте, для управління структуроутворення необхідно мати інформацію про кінетику його розвитку в даних умовах, щоб рішення про технологічні керуючі впливи були науково обгрунтовані і оптимальні.

Кожна стадія структуроутворення характеризується певними властивостями, що виникають в цей час: інтенсивністю виділення теплоти, пластичною міцністю, електропровідністю, ступенем гідратації. Досліджуючи непрямыми методами, кінетику змін цих властивостей за часом шляхом, побудови графічних залежностей можна на отриманих кривих виділити певні ділянки, характерні для різних стадій структуроутворення.

Як уже зазначалося, виключно важлива роль в структуроутворенні і формуванні фізико-механічних властивостей цементного каменю і бетону належить процесу утворення пор. Необхідно підкреслити, що саме пористість є основним носієм зазначених властивостей і практично весь арсенал сучасних методів і засобів оптимізації технології бетону фактично спрямований на досягнення однієї мети - отримання цементного каменю і бетону з заданими параметрами, котрі характеризують якісно і кількісно його пористість. На початкових стадіях формування структури утворюються гелеві пори, що займають приблизно одну третину обсягу гелю. Розміри гелевих пор і їх будова визначаються умовами гідратації цементу, змінюються на різних стадіях твердіння. Гелеві пори, найдрібніші в структурі, в початковій стадії структуроутворення заповнені адсорбованою на поверхні гелевих частинок водою, що знаходиться з ними в фізико-хімічному зв'язку. Ця вода випаровується дуже повільно і викликає не тільки утворення гелевих пор, але і внутрішній напружений стан, що призводить до зміни обсягу новоутворень і всієї системи в цілому.

Контракційні пори утворюються на стадіях вже досить сформованої системи в зв'язку з тим, що гідратація мінералів цементу відбувається зі зменшенням абсолютного обсягу вступають в реакцію речовин. У звичайних умовах твердіння контракційні пори виникають як замкнуті сполучені між собою порожнини і канали, заповнені повітрям. Контракція відбувається тривалий час в процесі твердіння цементу. Сукупний обсяг, розміри їх та характер контракційних пор залежить від ряду технологічних факторів. Встановлено, що контракція зростає з підвищенням активності цементу та тонкості помелу і водо-цементного відношення.

Система капілярних пор виникає на стадії початку утворення кристалізаційної структури. Капілярна пористість цементного каменю тим більше, чим вище початкове водо-цементне відношення і менше ступінь гідратації. З плином часу в умовах триваючої гідратації цементу обсяг капілярних пор виникає на стадії початку утворення кристалізаційної

структури. Капілярна пористість цементного каменю тим більше, чим вище початкове водо-цементне відношення і менша ступінь гідратації. З плином часу в умовах триваючої гідратації цементу об'єм капілярних пор зменшується, так як продукт гідратації поступово заповнює частину порового простору, зайнятого водою замішування. Однак при високих значеннях В / Ц (більше 0,6) утворений в процесі гідратації гель не може блокувати всі капіляри і проникність цементного каменю зростає.

Твердіння і структуроутворення цементного каменю в бетоні є основними провідними процесами, формують найважливішу властивість бетону, - міцність, проникність, довговічність та ін. Однак присутність в структурі бетону дрібного і крупного заповнювачів також впливає як на кінетику структуроутворення цементного каменю, так і на результат цього процесу. Частина води замішування «відволікається» заповнювачем для змочування поверхні його зерен і тим більше, чим більше їх питома поверхня. У цих умовах як-би знижується В/Ц і змінюється кінетика структуроутворення цементного каменю. Процес розвивається в тонких прошарках між зернами заповнювача, які взаємодіють з гідратами клінкерних мінералів, утворюючи контактні шари. Новоутворення на поверхнях контакту каменю із заповнювачем виконує важливу роль в забезпеченні зчеплення між ними. Склад новоутворень залежить від мінералогічного складу заповнювачів і умов твердіння бетону. Заповнювач підвищує водоутримуючу здатність цементного тіста, безпосередньо впливаючи на реологічні властивості бетонної суміші. Ступінь впливу визначається концентрацією заповнювача, який обмежує об'єми деформації тверднучого цементного тіста і цементного каменю.

Необхідно також відзначити роль заповнювача в утворенні макропор, які виникають при високій водопотребі бетонної суміші в результаті седиментації. Між зернами великого заповнювача утворюються прошарки води; після її випаровування вони перетворюються в макропори, і проникність бетону значно підвищується.

Причини утворення макропор на стадії технологічної обробки бетонної суміші (особливо жорсткою консистенції) може бути недостатнє її ущільнення. Розміри таких пор суттєво знижує міцність бетону, можуть досягати декількох міліметрів. Якість і ефективність ущільнення суміші визначають за коефіцієнтом ущільнення суміші. [1]

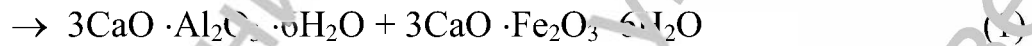
1.2 Вплив процесу гідратації цементу в бетоні на швидкість тужавлення бетону

Число факторів, що впливають на механізм і швидкість процесу гідратації портландцементу і твердіння цементного каменю, велике. Найважливіші з них такі: склад і структура клінкеру, тонкість його подрібнення, хімічні добавки і температура, середовище, в якому відбувається твердіння.

Кристали різних мінералів, що складають цемент, вступають з водою в типові для них реакції взаємодії. Тому механізм реакцій гідратації окремих мінералів у складі цементу, у крайньому випадку, в початковий період, залишається таким же, як і в індивідуальних системах. Однак наявність у водному розчині гідратуемого цементу поряд з іонами, що входять до складу даного мінералу, інші іони призводить до закладання на первинні реакції гідратації мінералів вторинних реакцій взаємодії їх продуктів, що після закінчення досить короткого часу призводить до утворення в гідратуемому цементному тесте комплексних з'єднань і до ускладнення процесу гідратації індивідуальних мінералів [1].

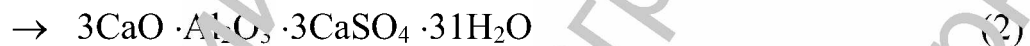
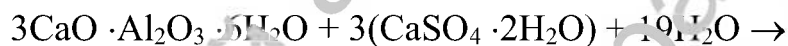
Цемент, змішаний з водою, спочатку утворює пластичну масу - цементне тісто, яке поступово густіє, твердіє і далі перетворюється в камінь. Процес твердіння портландцементу гідрозділяють на три періоди:

Період розчинення. Після затворення водою клінкерні мінерали починають розчинятись, створюючи насичений розчин, із якого випадають гідрати, відбуваються реакції гідратації і гідролізу:



У результаті реакції (1) хімічно зв'язується частина гідроокису кальцію.

У цілому цемент такого складу має короткі терміни схвачування через шестивалентний гідроалюмінат кальцію. Додавання гіпсу при розмеленні клінкера уповільнює протікання цих реакцій, тому що гіпс реагує з гідроалюмінатом, утворюючи важкорозчинну сіль - гіросульфалюмінат кальцію (сетрингіт), що екранує поверхню зерен (2).



Період колоїдації. Подальша гидратація викликає пересичення розчину, з якого починають випадати у виді дрібних (колоїдних) часток клінкерні мінерали. Колоїдні частинки мають клеючу здатність і передають цю здатність цементному тісту, забезпечуючи його прилипання до кам'яних матеріалів і їх склеювання. Внаслідок подальшого поглинання води мінералами її зміст у більшому виді зменшується, цементне тісто втрачає пластичність, і це відповідає початку схвачування.

Період кристалізації. Гідроокис кальцію і целіт найменш стійкі в колоїдному стані і першими починають кристалізуватися, виконуючи роль зародків. Одночасно відбувається ущільнення студнеподібного гелю, утвореного гіросилікатами кальцію. Вони кристалізуються повільно. У результаті кристали, що утворюються, формують зросток (каркас), що пронизує цементний камінь у різних напрямках, забезпечуючи високу міцність. Швидкість твердіння цементу залежить від швидкості взаємодії

клинкерних мінералів із водою (тобто від складу, товщини розмелення, температури та ін.)

Розподіл процесу твердіння на періоди умовний, тому що вони можуть протікати майже одночасно.

За сучасними поглядами, у початковий період (перша стадія гідратації) при змішуванні цементу з водою в процесі гідролізу трикальцієвого силікату виділяється гідроксид кальцію, утворюючи пересичений розчин. У цьому розчині знаходяться іони сульфату, гідроксиду і лугів, а також невелика кількість кремнезему, глинозему і заліза. Висока концентрація іонів кальцію і сульфат іонів спостерігається нетривалий час після затворення цементу водою, тому що протягом декількох хвилин з розчину починають осаджуватися перші новоутворення – гідроксид кальцію і еtringіт.

Приблизно через годину настає (друга стадія гідратації) для якої характерне утворення дуже дрібних гідросилікатів кальцію. Унаслідок того, що в реакції беруть участь лише поверхневі шари зерен цементу, то знову утворюються гідратні фази, які одержали назву цементного гелю і характеризуються дуже тонкою гранулометриєю, розмір зерен цементу зменшується незначно. Новоутворення, в першу чергу, з'являються на поверхні цементних зерен. Зі збільшенням кількості новоутворень і щільності їх упакування приграничний шар стає малопроникним для води приблизно протягом 2-6 годин. Другу стадію уповільненої гідратації прийнято називати «індукційним періодом» гідратації цементу.

Протягом індукційного періоду цементне тісто являє собою щільну суспензію, стабілізовану дією флокулюючих сил. Однак сили притягання між цементними частками у воді відносно слабкі. Це може бути пояснене тим, що покриті гелем зерна цементу утворюють навколо себе сольватний шар і мають позитивний ψ - потенціал. Спільна дія сольватного шару та електричного заряду перешкоджає безпосередньому контакту між близькими

зернами. Разом з тим ці зерна мають міжчасткове притягання, принаймні на деяких приграничних ділянках. Сили відштовхування і притягання врівноважуються на деякій відстані від поверхні розподілу, де потенційна енергія часток мінімальна. Цементне тісто під дією цих сил стає зв'язним і рухливим. Протягом індукційного періоду відбувається поступове поглинання поверхневими оболонками цементних зерен води. Товщина водяних прошарків між зернами зменшується, поступово збільшується рухливість тіста і бетонної суміші. У гелевих оболонках з'являється осмотичний тиск. Внутрішні шари цементних зерен, реагуючи з водою, прагнуть розширитися. У результаті відбувається руйнування гелевих оболонок і полегшується доступ води всередину цементних зерен, прискорюється процес гідратації цементу [3].

Настає третьє стадія процесу гідратації. Вона характеризується початком кристалізації гідроксиду кальцію з розчину. Цей процес відбувається дуже інтенсивно. У просторі між частками цементу відбувається вільний ріст тонких пластинок гідроксиду кальцію, гідроксидатів кальцію і еtringіту у вигляді довгих волокон. Волокна новоутворення проходять через пори, розділяють їх на більш дрібні і створюють просторовий зв'язок, підсилюючи зчеплення між гідратними фазами і зернами цементу. Зі збільшенням вмісту гідратних фаз між ними виникають безпосередні контакти, число яких збільшується – цементне тісто тужавіє, твердіє, утворюється цементний камінь [3].

Тверда структура, що утворилася спочатку є дуже пухкою, але поступово вона ущільнюється, у заповнених водою порах цієї структури безупинно утворюються нові гідратні фази. Об'єм пор і їхні розміри зменшуються, зростає кількість контактів між новоутвореннями, товстішають і ущільнюються гелеві оболонки на зернах цементу, що зростаються в суцільний цементний гель, із включеннями непрореагованих центрів цементних зерен. У результаті зростає міцність цементного каменю [4].

При повній гідратації цементу в хімічний зв'язок з його мінералами вступає приблизно 20-25% води від маси цементу. Гідратація цементу супроводжується зміною об'єму його різних фаз. У процесі гідратації води, що вступає в реакцію з цементом, набуває регулярної структури і загальний об'єм системи "цемент-вода" зменшується, у той час як об'єм твердої фази за рахунок приєднання води збільшується (рис. 1.1). [3]

Гідратований цемент займає об'єм у 2,1-2,2 разів більше, ніж об'єм цементу до гідратації, але менший на 0,254, ніж сумарний об'єм цементу і зв'язаної води. Середнє значення щільності продуктів гідратації (включаючи пори гелю) у насиченому водородостанні приблизно складає 2100-2200 кг/м³.

Рис. 1.1.1 Зміна об'єму твердої і рідинної фази у системі "цемент-вода" при гідратації цементу (при В/Ц < 0.5): 1 – об'єм негідратованого цементу; 2 – початковий об'єм води; 3 – об'єм твердої фази гідратованого цементу; 4 – об'єм вільної води; 5 – об'єм контракційних пор; 6 – об'єм цементного гелю разом з порами

Зменшення об'єму системи цемент-вода в процесі гідратації одержало назву контракції. У середньому величина контракції складає 7-9 см³ на 100 г цементу.

Цемент гідратує тривалий час. Ступінь його гідратації α до визначеного моменту визначають як відношення води, зв'язаної до цього моменту W_t , до кількості води, зв'язаної при повній гідратації W_{max}

$$\alpha = W_t / W_{max}$$

У зв'язку з тим, що більшість новостворів цементного каменю мають коллоїдні розміри, то в процесі гідратації поверхня твердої фази значно збільшується. Питома поверхня гелю досягає величини $5,5 \times 10^6$ м²/см³ чи

2×10^6 см²/кг, у той час як питома поверхня негідратованого цементу в середньому дорівнює 3000 см²/г.

На поверхні гелю адсорбується велика кількість води, що відсмоктується з більш великих пор. Вода в порах гелю міцно утримується поверхневими силами і тому не може бути використана для гідратації ще не гідратованого цементу. Щільність води в порах гелю складає 1100-1150 кг/м³. Об'єм води, фізико-хімічно зв'язаної поверхнею гелю, приблизно дорівнює об'єму хімічно зв'язаної води. За даними Т. Пауерса і С. Брунаура, загальна кількість хімічно зв'язаної води при повній гідратації цементу (у цементному гелі) складає 47-52% від маси цементу (у середньому 50%). Для повної гідратації цементу необхідно, щоб В/Ц було більше 0,5.

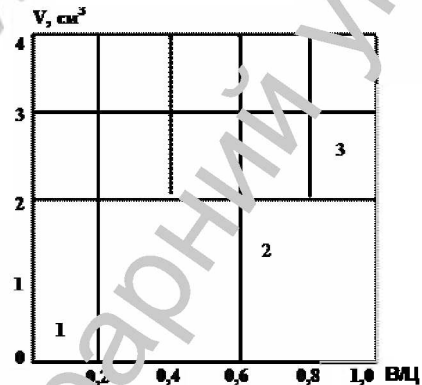
Якщо цементний камінь твердіє у воді, то повна гідратація цементу відбувається і при менших В/Ц, тому що вода може дифундувати через капілярні і контракційні пори, які частково звільняються від води в результаті гідратації. Однак необхідно, щоб об'єм цих пор був достатній для розміщення продуктів гідратації. Це має місце при В/Ц > 0,38; при менших В/Ц повна гідратація цементу неможлива.

Таким чином, при В/Ц > 0,5 у бетоні завжди будуть присутні капілярні пори, доступні для міграції води, і стійкість його буде знижуватися. При В/Ц = 0,38-0,5 у цементному камені можуть зберегтися капілярні і контракційні пори при відсутності припливу вологи ззовні за рахунок того, що не буде ніяким проходити гідратація цементу. При водяному твердінні ці пори частково заростають продуктами гідратації. При В/Ц < 0,38 у цементному камені відсутні капілярні пори. Він весь складається з цементного гелю, але в ньому обов'язково зберігаються залишки негідратованого цементу. Ці залишки сприяють ущільненню матеріалу і підвищенню його міцності.

Зміна складу цементного каменю у процесі його гідратації залежно від В/Ц показана на рис. 1.1.2.

У звичайних бетонах цемент рідко гідратується повністю. При звичайних термінах твердіння встигає прогідратуватися тільки частина цементу, тому навіть при В/Ц = 0,5 і вище у цементі зберігаються негідратовані зерна, значна кількість капілярних пор [3].

Рис. 1.1.2 Зміна структури цементного каменю після повної гідратації цементу залежно від В/Ц:



1 – негідратований цемент;

2 – цементний гель;

3 – капілярна вода (пори)

У бетоні цементний камінь у результаті введення заповнювача займає тільки частину об'єму, тому, хоча загальний характер залежностей збігається, відносні величини їх менше. Якщо початкова капілярна пористість для цементного каменю при В/Ц = 0,5 досягає 61%, то у бетоні при витраті 170 л води і цементу 340 кг на 1 м³ бетонної суміші вона зменшується до 17%.

При зміні витрати цементу і води пористість також змінюється. Орієнтовно можна розрахувати, що для пониження капілярної пористості на 1 % необхідно зменшити витрату води на 10 л/м³ або на 20...30 кг/м³ підвищити витрати цементу.

Зменшення капілярної пористості веде до підвищення міцності і стійкості бетону, тому на виробництві прагнуть готувати бетонну суміш з мінімальною кількістю води, яка забезпечує необхідну легкоукладальність.

Портландцемент виділяє тепло при реакції з водою. Виділення тепла при гідратації портландцементу є властивістю, яке має велике теоретичне і практичне значення, так як взаємодія цементного порошку з водою при укладанні бетону великими масами може повести до значного розігріву бетону до 30-50 ° і більше.

Встановлено, що чим швидше відбувається гідратація портландцементу, тим швидше і в більшій кількості виділяється тепло. Цементи з високим вмістом трьохкальцієвого силікату і алюмінату є джерелом більш швидкого і значного теплоутворення в бетонних масивах, ніж цементи з високим вмістом двухкальцієвого силіката та чотирьохкальцієвого алюмоферита. Однак останні цементи мають нижчу міцність.

Безпосереднє спостереження за продуктами гідратації на ранніх стадіях процесу складнено, тому зазвичай про кінетику цих реакцій судять по кінетиці супутніх явищ, наприклад тепловиділення. Крива тепловиділення при гідратації портландцементу приведена на графіку 1.1.3 [2].

Рис.1.1.3 Криза тепловиділення при гідратації портландцементу

Коротка початкова стадія інтенсивного тепловиділення зв'язана з приєднанням води на поверхні і утворенням аквакомплексів. Потім настає більш менш тривалий інкубаційний період II, протягом якого тепловиділення відбувається дуже повільно. Природа існування цього періоду до кінця не з'ясована. Багато вчених пов'язують наступ інкубаційного періоду із утворенням блокуючих плівок продуктів гідратації навколо зерен вихідного цементу, що перешкоджають надходженню до них води. З іншими уявленнями, інкубаційний період необхідний для перетворення аквакомплексів в зародки нової кристалічної фази. Його тривалість у цьому випадку залежить від співвідношення швидкостей розчину вихідної речовини та росту кристалів нової фази, а також від величини питомих поверхонь їх частин. Чим більша питома поверхня та швидкість розчинення вихідної речовини, тим коротший інкубаційний період [2].

Перші значення теплоти гідратації $C_3S + C_2S$ були отримані Вудсом, Стейнором і Старком непрямым шляхом, який був у знаходженні теплоти гідратації портландцементу певного хімічного складу по різниці теплот розчинення в кислоті вихідного і гідратованого цементу, який гідратованого протягом заданого проміжку часу. Обробивши отримані дані за допомогою статистичного методу найменших квадратів, вони знайшли зв'язок між тепловиділенням цементу і його мінералогічним складом [2].

Пауерс і Броньярд з'ясували, що теплота, що виділяється при гідратації портландцементу, є сумарною і складається із теплоти гідратації як такої і

теплоти адсорбції води на продуктах гідратації. Вони знайшли, що теплота адсорбції води може досягати $\frac{1}{4}$ частини загального тепла гідратації [5].

1.3 Вплив температури прогрівання на бетонну суміш

Температура прогрівання – це фактор інтенсифікації процесу тужавлення бетонної суміші на ранніх стадіях, зміни швидкості структуриутворення та забезпечення заданих властивостей бетону [2].

Як відомо, теплова обробка бетону – це найбільш ефективний спосіб прискорення тужавлення, що знайшов більш широке застосування при заводському виготовленні бетонних виробів. Температура має значний вплив на тужавлення портландцементу. Завдяки підвищенню температури бетонних сумішей відбувається значне прискорення їх набору міцності. Він стає помітним вже при температурі бетонної суміші 30–40 °С. Різке прискорення процесів тужавлення цементної суспензії та бетонної суміші настає при температурі 70–90 °С і вище. Проте використання таких підвищених температур призводить до по-дорожчання самих виробів. Билодом з цієї ситуації може бути застосування хімічних добавок, які дозволять знизити температуру нагрівання, не зменшуючи швидкість набору міцності [6].

Биломо, що попереднє витримання бетонної суміші до теплової обробки підвищує кінцеву міцність бетону, дозволяє застосовувати більш форсовані режими, що скорочує тривалість теплової обробки. Особливо попереднє витримання необхідно при прогріві виробів без форм або з великою відкритою поверхнею. Прогрівання ж виробів, які знаходяться в металевих формах, закритих з усіх боків, не потребує попереднього витримання, оскільки форма перешкоджає розширенню бетону. У цьому випадку можливий різкий підйом температури [7].

Термосиловий спосіб виготовлення дрібнорозмірних бетонних виробів з використанням хімічних добавок не потребує попереднього витримання бетонної суміші. Нагрівання здійснюється форсованим електророзігрівом у

формах або попереднім розігрівом бетонної суміші з наступним укладанням у підігріту форму. І хоча ця технологія потребує додаткового устаткування для розігріву бетонної суміші, однак, перспективність цього способу виготовлення дрібнорозмірних бетонних виробів полягає в можливості збільшення оборотності прес-форм, зменшенні тривалості прогріву та підвищенні якості бетону.

Багато вчених досліджували вплив прогріву бетону на фазовий склад новоутворень, які виникають при гідратації C_3S та C_2S . Ними встановлено, що прогріті зразки мають меншу кількість гелю, чи меншу кількість води, яка зв'язана з гелем, що зникає на перших стадіях нагрівання зразка. Що стосується ефектів на диференціальних кривих нагрівання зразків, що тверділи в різних умовах після прогрівання, то вони не містили в собі нічого нового в порівнянні з ефектом, що спостерігається у зразків, які тверділи при $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$.

Дослідження вченими процесів гідратації C_3S при температурах 50–90 $^\circ\text{C}$ показали, що при твердненні композитів спостерігаються ті ж закономірності, що й при нормальному твердненні [8].

Кінетика гідратації алюмосиричних мінералів в температурному режимі від 20 до 90 $^\circ\text{C}$ показала, що швидкість гідратації цих мінералів значно підвищується в міру зростання температури тверднення [8].

За кількістю $\text{Ca}(\text{OH})_2$, який виділяється, та зв'язаної води було встановлено, що в порівнянні з процесами гідратації при 20 $^\circ\text{C}$, прогрівання при 80 $^\circ\text{C}$ прискорює реакції гідратації в 6 разів, а при 100 $^\circ\text{C}$ – в 10 разів [9].

При нормальних умовах тверднення формування структури відбувається у відносно спокійних умовах, оскільки основні складові бетону не зазнають значних об'ємних змін під дією температури. В цих умовах температурні градієнти виникають лише за рахунок саморозігріву бетону в результаті екзотермічних реакцій при гідратації цементу [2].

Як відомо, процес прогрівання складається з таких чотирьох процесів: підвищення температури, витримання на проміжку визначеного часу при максимальній температурі та охолодження в об'єкті до температури навколишнього середовища [1].

Температурний градієнт призводить до виникнення температурних напружень, оскільки зовнішні більш нагріті шари збільшуються в об'ємі в більшій мірі, ніж зручні. В цей період, особливо при швидкому нагріванні бетону, можуть виникнути значні напруження, в результаті яких утворюються тріщини, а також відбувається порушення контактів між цементним каменем та заповнювачем. Це є досить значним недоліком.

Температурний градієнт між зовнішніми та внутрішніми шарами спостерігається до тих пір, поки виріб не прогріється по всьому об'єму. При тепловій обробці бетону, в результаті температурного розширення, збільшується в об'ємі. Якщо бетон твердіє у формі, яка фіксує його об'єм, то при нагріванні складові бетону будуть намагатись зайняти об'єм повітряних комірок чи завдати їх температурному розширенню. Внаслідок цього парціальний тиск пароповітряної суміші в порі буде значно підвищуватись. Якщо металева форма закрита з усіх боків, то явних структурних порушень не спостерігається [2].

Таким чином, на стадії підвищення температури створюються сприятливі умови для хімічних реакцій. При підвищеній температурі в бетоні повністю зберігається, і навіть збільшується, кількість води в порівнянні із введеною при замішуванні [2].

Нормальною температурою твердіння бетону умовно вважають 15-20 °С. При знятті або підвищенні температури середовища швидкість протікання фізико-хімічних процесів взаємодії мінералів в'язучого з водою змінюється. З наближенням температури до 0 °С, твердіння бетону, особливо в ранньому віці, різко сповільнюється, так як при цьому сильно знижується активність води в реакції гідролізу і гідратації. При подальшому зниженні

температури вода в бетоні замерзає, але не відразу: частина води при негативних температурах взагалі залишається в рідкій фазі, і крім того відбувається виділення теплоти бетону, що твердіє. Тому процес твердіння бетону, хоча і дуже повільно, триває. Вода в структурі тверднучого бетону поступово перетворюється на лід і при $-10 - 15^{\circ}\text{C}$ процес твердіння практично припиняється.

При замерзанні вода збільшується в об'ємі приблизно на 9%, що викликає збільшення обсягу твердіючої бетонної суміші, розбухання, порушення контактів зчеплення між частинками. Тому замерзання бетону в ранньому віці неминуче призведе до порушення нормальної роботи структури і значного зниження міцності.

Підвищення температури твердіння бетону викликає активізацію фізико-хімічних процесів структуроутворення, зростання міцності бетону прискорюється. Склад новоутворень в результаті гідратації клінкерних мінералів при цьому в порівнянні з нормальним твердінням (20°C) практично не змінюється.

Разом з тим виникають і негативні ефекти теплової обробки свіжоукладеного бетону. До числа відносяться збільшення пористості і появу дефектів у структурі бетону, що твердіє в результаті неоднакового теплового розширення твердої рідкої і газоподібної фаз. Повітря і вода заповнюють паровий простір свіжоукладеного бетону, при нагріванні розширюються значно більше, ніж тверді частинки; виникає внутрішній надлишковий тиск, обсяг бетону та його пористість збільшуються, що є деструктивним процесом. При цьому відбувається не тільки збільшення загальної пористості а й змінюється співвідношення між порами і капілярами різного радіусу, збільшується вміст макропор. Такі фізико-механічні властивості бетону, як міцність, щільність, морозостійкість знижуються в результаті зміни параметрів капілярно-пористої структури, а не фазового складу новоутворень.

Слід зазначити, що як при підвищенні температури твердіння свіжеущільненого бетону так і при ранньому його заморожуванні деструктивні явища мають аналогічну фізичну природу, збільшення об'єму і пористості бетону і порушення структури в результаті виникнення внутрішнього тиску. Як і в разі бетонування при негативних температурах при тепловій обробці бетону необхідно спочатку забезпечити умови тверднення, при яких буде досягнута критична міцність структури, що здатна витримати внутрішні напруження розриву при нагріванні. Таким чином, зовнішньою ознакою прояву деструкції як в процесі твердіння і технологічній обробці бетону, так і при опорі бетону зовнішнім механічним впливам є збільшення необоротне збільшення його об'єму. Інша негативна сторона твердіння бетону при підвищених температурах (60-100 °С) - зменшення дисперсності новоутворень. Укрупнення кристалогідратів призводить до зменшення числа контактів зрощення в структурі новоутворення відбувається так званий «старіння» гелю (по А.В.Волженському). Збільшення температури твердіння понад 100 °С здійснюване при автоклавній обробці бетону в середовищі насиченої водяної пари високого тиску (0,8 ... 1,3 МПа) не тільки прискорює процес твердіння, але і створює умови для утворення якісно нових продуктів гідратації [1].

Гідратація цементу являє собою хімічний процес. Тому твердіння бетону прискорюється при підвищенні температури і сповільнюється при її зниженні. Нижче мінус 10 - мінус 20 ° С твердіння не відбувається. Сильне прискорення твердіння бетону при високих температурах використовується при тепловій обробці бетону. При виготовленні монолітного бетону для встановлення кінетики твердіння потрібно знати залежність наростання міцності від сезонних коливань температури.

При температурах нижче 0 ° С твердіння можливо, якщо вода знаходиться ще в рідкому стані. Це досягається за допомогою добавок, що знижують температуру замерзання. При низьких температурах гідратація сповільнюється. Однак цемент ще гідратується при температурі - 10 ° С *

але лише в тому випадку, якщо бетон частково твердне до настання сильних холодів і в результаті містить достатню кількість цементного каменю. У його найдрібніших порах вода не замерзає навіть при -20°C , завдяки чому можливий процес гідратації. Утворений в невеликій кількості при низьких температурах гель заповнює пори частково затверділого бетону, помірно підвищуючи його міцність. Тому, бетон, який затвердів після попередньої теплової обробки, здатний до додаткового тверднення і при низьких температурах.

У разі застосування портландцементу низькі позитивні температури не роблять негативного впливу на бетон, який, як правило, набуває високу міцність в певні терміни, якщо він твердне в стані «сполою». Аналогічно впливають на процеси твердіння бетону і добавки сповільнювачі. Навпаки, при високих температурах твердіння, в результаті згупнення структури цементного каменю, кінцева міцність бетону може бути нижче, ніж при нормальному твердінні.

При графічному зображенні ступінь зрілості виражається довжиною між температурної кривої і абсцисою, що відповідає температурі 10°C . При нерівномірному зміні температури її можна обчислити на міліметровому папері (рис. 13.3).

Якщо відома міцність, що досягається за певних часу твердіння і

Рис. 13.3. Приклад однакового ступеня дозрівання бетону. Якщо при змінній температурі необхідна ступінь дозрівання бетону досягається через 60 годин при 1020 град. год, то при підвищеній постійній температурі – вже після 34 годин. В обох випадках бетон однакового складу показує рівну міцність на стиск.

температурі (t_1, T_1), то, користуючись правилом Зауля, можна обчислити час твердіння t_x , необхідне для досягнення тієї ж міцності бетону при інших температурах твердіння T_x ,

$$t_x = t_1 \frac{T_1 + 10}{T_x + 10}$$

Правило Зауля може бути застосовано з достатньою точністю при температурах до -10°C . Тому при виготовленні монолітного бетону як влітку, так і взимку його можна насамперед застосовувати для визначення термінів розгалубки. У разі прискореного твердіння при високих температурах пропонуються інші формули. З кількох значень ступеня зрілості відповідним їм міцності будується крива регресії, що дозволить визначати для даної ступеня зрілості відповідне значення міцності.

Зі сказаного можна побачити наступне:

- При високих температурах процес затвердіння бетону значно прискорюється, але це може призвести до зниження кінцевої міцності виробів;
- При низьких температурах процес затвердіння бетону сповільнюється, проте це може призвести до зростання кінцевої міцності виробів;
- При температурі нижче -10°C бетон не твердіє по залежності між міцністю і ступенем зрілості бетону вдається оцінювати нарощання його міцності при різних температурах.

Підсумовуючи вище зазначене, можна зробити висновок, що не всі види добавок можна використовувати при тепловій обробці бетонної суміші. Але оскільки під час теплової обробки в бетоні протікають деструктивні процеси, які негативно відображаються на характеристиках міцності, довговічності та якості бетонних виробів, то такі хімічні добавки, як глестифікатори, прискорювачі тверднення та ущільнювачі, сприяючи

швидкому зростанню міцності бетону, перешкоджають розвитку деструкції, яка зумовлена явищами тепло- та масообміну, а також температурними напруженнями.

1.4 Вплив заповнювачів та вологості

Заповнювач значно впливає на структуроутворення бетонної суміші. Заповнювач може утворювати жорсткий каркас, що зміцнює структуру на першій стадії її формування. Заповнювач суттєво впливає на умови твердіння цементного каменю. У бетоні взаємодія цементу з водою і його твердіння відбувається у тонких прошарках між зернами заповнювача при постійній взаємодії з ним. Заповнювач підриджує водоутримуючу спроможність цементного тіста, обмежує усадочні деформації, сприяє утворенню кристалічного каркасу цементного каменю.

Таким чином, заповнювач чинить суттєвий вплив на формування структури цементного каменю і бетону. Це звичайно враховується при визначенні властивостей і проектуванні складу бетону.

З незахищеної поверхні бетону може випаруватися значна кількість води. Вона коливається в залежності від температури і вологості повітря, температури бетону, сонячного випромінювання і швидкості вітру від 100 до 1000 г з 1 м² в 1 год.

Уже в перші дні після бетонування на гідратацію цементу витрачається велика кількість води (мал. 1.4.1)

Мал.1.4.1 Приклад зв'язування води портландцементом при В/Ц= 0,32 та 0,4.

Передчасне зневоднення порушує або перериває твердіння і тому особливо небезпечно для молодого бетону. Випаровування води не тільки впливає на набір міцності, але і веде до високого водопроникнення бетону, яка, в свою чергу, знижує його стійкість до дії агресивних середовищ, морозостійкість і здатність захищати від корозії арматуру. Крім того, твердіння порушується, перш за все в поверхневій зоні, безпосередньо піддається вивітрюванню, а в деяких спорудах також механічному або динамічному впливу. На недостатню вологість вказує відділення піску від поверхні бетону. Крім того, в результаті швидкого випаровування води на поверхні можуть виникнути усадочні тріщини, що знижують міцність довговічність бетону. У порівнянні з витримкою в воді такі бетони вже після 90 днів відрізняються від бетонів нормально-вологого зберігання значним недобором міцності, тим більшим, ніж раніше бетон почали зберігати в повітряно-сухому середовищі. Тому бетон необхідно зберігати у вологому стані при нормальних температурних умовах не менше 7 днів після бетонування, а при високих температурах твердіння-до досягнення міцності, складовою 50-70% міцності у віці 28 днів.

Отже, тільки при досить тривалому витримуванні бетону у вологому стані можна повністю використувати його здатність до твердіння і придбання корозійної стійкості; недостатній догляд повинен компенсуватися більш високою витратою цементу.

1.4 Вологоментне відношення

Зі зменшенням В/Ц не тільки підвищується міцність бетону, але і збільшується швидкість набору міцності в початковий період твердіння. На малюнку 3.4 дано графік залежності міцності бетону на портландцементі марки М400 від тривалості твердіння при різних значеннях В/Ц. З графіка видно, що в міру зменшення В/Ц і збільшення міцності бетону приріст

міцності з часом знижується і галяки. Таким чином, зниження В/Ц і застосування жорстких сумішей є технологічним прийомом, які можна застосовувати для прискорення твердіння бетону.

РОЗДІЛ 2

МЕТА РОБОТИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

Мета роботи: розробити математичну модель зростання міцності бетону заданого класу в процесі твердіння.

Об'єкт дослідження: міцність бетону.

Предмет дослідження: моделювання швидкості зростання міцності бетону в процесі твердіння.

Задачі досліджень:

- аналітичний огляд літературних джерел, узагальнення результатів досліджень з питань твердіння бетону та зростання його міцності в процесі твердіння, вплив різних факторів на процес твердіння бетону;

- теоретичне обґрунтування можливості математичного моделювання процесів швидкості твердіння бетону та зростання його міцності;

- дослідження математичної моделі зростання міцності бетону в процесі твердіння;

- верифікація розробленої моделі на фізичних моделях твердіння бетону;

- формулювання висновків.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Основні підходи при складанні математичних моделей

Математичний метод моделювання заключається у розробці математичної моделі, вибору її рішення і аналізу отриманого результату. Математичне формулювання задачі зазвичай представляється у вигляді чисел, функції, систем рівнянь і т.д. Об'єкт чи явища може бути у неперервній формі чи дискретній формі, детермінованій чи стохастичній формі. Математична модель - це система математичних відношень.

Перший етап математичного моделювання:

- постановка задачі;
- визначення об'єкта і мети досліджень;
- задання критеріїв і вивчення об'єкта.

Тут також встановлюються межі області впливу об'єкту, що вивчається. Вони встановлюються в залежності від значимості взаємодії із зовнішнім середовищем чи об'єктом. Встановлення меж дозволяє розглядати систему, що моделюється, як замкнуту, а це спрощує математичне моделювання. Другий етап - вибір типу математичної моделі для виявлення типу математичної моделі. Проводять пошуковий експеримент, який дозволяє установити:

- лінійність чи не лінійність;
- стаціонарність чи не стаціонарність;
- ступінь детермінованості досліджуваного об'єкта чи явища.

Лінійність чи нелінійність може бути встановлена по статистичних характеристиках. Під статистичною характеристикою розуміють зв'язок між величиною зовнішньої дії на об'єкт, величиною його реакції на зовнішню

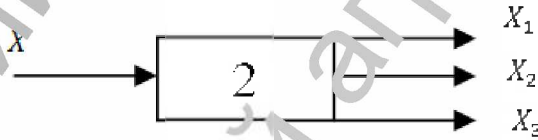
дію. Встановлення динамічності чи статичності проводиться по зміні досліджуваних показників за часом. При виборі типу моделі імовірного об'єкту важливо встановлення його стаціонарності. Звичайно про це судять по зміні в часі параметрів законів розподілу випадкових величин. Частіше за все для цього використовують середнє арифметичне випадкової величини, середнє квадратичне відхилення випадкової величини від середнього арифметичного або середньоквадратичного відхилення за часом. Встановлення загальних характеристик об'єкту дозволяє вибрати математичний апарат, на базі якого будується математична модель. Вибір математичного апарату для побудови моделі може бути рекомендований наступним чином (Рис.3.1)

Рис. 3.1.1 Вибір математичного апарату при побудові математичної моделі

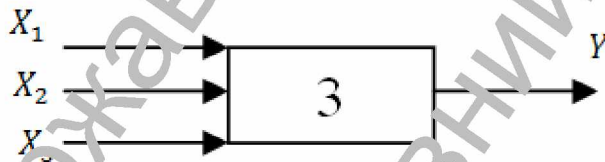
На вибір моделі може вплинути інформація інших авторів, вибрана гіпотеза. Третій етап - вибір виду математичної моделі в даному класі. Особливе місце на даному етапі займає опис перетворення вихідних сигналів у вихідні характеристики об'єкту. Результати пошукового експерименту та аналіз інформаційного масиву дозволяє установити схему взаємодії об'єкта із зовнішнім середовищем, співвідношення вхідних і вихідних величин. В принципі можливо встановити 4 схеми взаємодії:



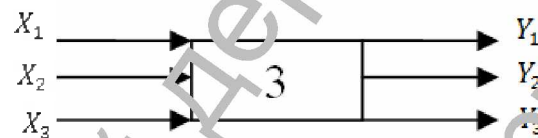
Одномірна-одномірна - на об'єкт діє один фактор і його поведінка оцінюється за одним показником.



Одномірна-багатомірна - на об'єкт діє один фактор, а його поведінка оцінюється декількома показниками.



Багатомірна-одномірна - на об'єкт діє декілька факторів і його поведінка оцінюється одним показником.



Багатомірна-багатомірна - на об'єкт діє декілька факторів і його поведінка оцінюється декількома показниками.

при схемі 1):

- стаціонарний детермінований об'єкт: вихідна дія із вхідним сигналом пов'язується через постійний коефіцієнт $y = kx$;

- нестаціонарний детермінований об'єкт: зв'язок описується різними функціями - $y = f(x)$ або поліномом;

при схемі 2):

- для стаціонарного і не стаціонарного детермінованого об'єкту зв'язок вхідного сигналу з вихідним аналогічний (схемі 1), але математичні моделі будують такими: вхідна дія буде пов'язана із кожним вихідним сигналом. Вихідні сигнали вважаються незалежними.

при схемі 3):

- стаціонарний детермінований об'єкт: $y = a \sum_{i=1}^n x_i$ - при рівнозначній вхідній дії, $y = \sum_{i=1}^m a_i x_i$ - при нерівнозначній вхідній дії

- нестаціонарний детермінований об'єкт: математична модель у вигляді повного полінома $y = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i x_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m a_{ij} x_i x_j + \dots$

при схемі 4):

- математична модель будується аналогічно схемі 3)

при відсутності апріорної інформації про зв'язок вхідних і вихідних сигналів об'єкта, динаміка об'єкта описується диференціальними рівняннями на основі деяких припущень або знань про еластичності об'єкта.

Деякі загальні підходи до складання таких рівнянь.

Геометричні і фізичні задачі, як правило, приводять до одного із слідуючих трьох видів рівнянь:

- Диференціальні рівняння в диференціалах;

- Диференціальні рівняння в похідних;

-інтегральні рівняння з наступним перетворенням в диференціальні рівняння.

1. Рівняння в диференціалах.

Із умови задачі складаються приблизні співвідношення між диференціалами. Для цього малі прирощення величини заміняють їх диференціалами. Нерівномірно протікаючі процеси за малий проміжок часу розглядаються як рівномірні. Так як відношення диференціалів функції аргументу є границею відношень їх приросту, то по мірі того, як приріст наближається до нуля прийняте припущення використовується з великою точністю. Отримані диференціальні рівняння є точними якщо вони однорідні лінійні відносно диференціалів.

2. Рівняння похідних

Суть методу похідних заключається в тому, що з умови задачі складаються наближені співвідношення між швидкостями змін функції і аргументу. Відсутність нескінченно малих в методі похідних умовна.

3. Інтегральні рівняння

При розгляді роботи сил, об'ємів тіл, площ криволінійних поверхонь, їх можливо описати за допомогою визначених інтегралів. У випадку при такому опису невідома функція потрає під знак інтегралу, то отримаємо формальну залежність, яка називається інтегральним рівнянням.

Після диференціювання інтегрального рівняння воно перетворюється в диференціальне.

3.2 Побудова емпіричних формул

При вивченні закономірностей, що спостерігаються в різноманітних явищах природи, виникає необхідність за даними натурних спостережень побудувати математичну формулу, тобто представити результати натурального експерименту у вигляді функціональної залежності, наприклад, у вигляді елементарних функцій. Як правило, при побудові такої так званої емпіричної формули починають з того, що дані натурних спостережень або дані лабораторного експерименту заносяться у таблицю, а потім значення аргументу і функції переносять на міліметровку або інший аркуш паперу. Після цього, виходячи з форми розташування точок на папері, підбирають вид функції (формули), яка б описувала наближено закономірність розташування точок, зображених на папері за даними натурального експерименту.

Найбільш точним методом визначення параметрів емпіричних формул є метод найменших квадратів. Проте у більшості випадків можуть бути успішно застосовані простіші методи, зокрема, метод середніх. Якщо отримана по цьому методу формула виявиться недостатньо точною, для подальшого її уточнення вже може бути використаний метод найменших квадратів, причому знання наближених значень параметрів дозволить зробити обчислення менш громіздкими. По методу середніх спочатку визначається лінійна залежність між змінними X та Y $Y = aX + b$. Для цього умовні рівняння $Y_i = aX_i + b$ для наявних пар значень X_i і Y_i діляться на два рівні в порядку зростання змінної X , а Y . Складаючи рівняння кожної групи, отримаємо два рівняння, з яких і визначаються a і b . Виражаючи X і Y через первинні змінні, отримаємо стукану залежність між x та y . Якщо при цьому ще не усі параметри будуть визначені, то слід застосувати знову той же метод, зрівнюючи вже інші величини X і Y .

Процес підбору емпіричної формули для встановленої з досвіду функціональної залежності розпадається на дві частини: спочатку вибирається вид формули і вже після цього визначаються чисельні значення параметрів, для яких наближення до цієї функції виявляється найкращим. Якщо немає яких-небудь теоретичних міркувань для підбору виду формули, зазвичай вибирають функціональну залежність з числа найбільш простих, порівнюючи їх графіки з графіком заданої функції. Використання лінійної математичної моделі значно спрощує її аналіз. Наприклад, лінійна модель дозволяє використати принцип суперпозиції. Принцип суперпозиції стверджує, що коли на лінійну систему діє декілька сигналів, то загальний вихідний сигнал утворюється в результаті складання її реакції на кожний вхідний сигнал.

Нелінійну модель можливо перетворити в лінійну, використавши метод вирівнювання.

Метод вирівнювання полягає в наступному: в припущенні, що між Y і X існує залежність певного виду, знаходяться деякі величини $X = \varphi(x, y)$ і $Y = \psi(x, y)$ які при зробленому припущенні пов'язані лінійною залежністю (наприклад, якщо $y = \frac{x}{a+bx}$, то беруть $X = x, Y = \frac{x}{y}$, або $X = \frac{1}{x}, Y = \frac{1}{y}$). Обчислюючи для заданих значень x та y відповідні значення X і Y і зображуючи їх графічно, легко відразу побачити, чи близька залежність між X і Y до лінійної (чи лягають відповідні точки приблизно на пряму лінію) і, отже, чи підходить в обрану формулу або ні.

Вказівки відносно вирівнювання деяких простих формул дані нижче з вказівками на відповідні графіки [4].

I. $y = ax^b$. Заміна $X = \lg x$ та $Y = \lg y$:

$$Y = \lg a + bX$$

II. $y = ae^{bx}$. Заміна x та $Y = \lg y$:

$$Y = \lg a + b \lg e \cdot x$$

III. $y = ax^b + c$. Графіки такі ж як і для формули I, зміщені в напрямку осі Oy . Якщо b задано, замінюють $X = x^b$ та y :

$$y = aX + c$$

Якщо b невідомо, заміна $X = \lg x$ та $Y = \lg (y - c)$:

$$Y = \lg a + bX$$

Визначивши спочатку c . Для цього знаходять на графіку 3 точки з абсцисами x_1, x_2 , та $x_3 = \sqrt{x_1 x_2}$ та ординатами, відповідно y_1, y_2, y_3 (x_1, x_2 вибирають випадково) та приймають $c = \frac{y_1 y_2 - y_3^2}{y_1 + y_2 - 2y_3}$.

IV. $y = ax^{1/x} + c$. Графіки ті ж, що і для формули II, зміщені в напрямку осі Oy . заміна $Y = \lg (y - c)$ та x ,

$$Y = \lg a + b \lg e \cdot x$$

визначивши спочатку c . Для цього знаходять на графіку заданої функції три точки з абсцисами x_1, x_2 , та $x_3 = 1/2(x_1 + x_2)$ та ординатами, відповідно y_1, y_2, y_3 та приймають $c = \frac{y_1 y_2 - y_3^2}{y_1 + y_2 - 2y_3}$.

$$V. \quad y = ax^2 + bx + c. \quad Y = \frac{y - y_1}{x - x_1};$$

$$Y = (b + ax_1) + ax$$

Якщо задані значення x утворюють арифметичну прогресію з різницею в h , то заміна $Y = \Delta y$:

$$Y = (bh + ah^2) + 2ahx$$

в обох випадках після знаходження a та b знаходять c з рівняння

$$\sum y = a \sum x^2 + b \sum x + nc,$$

де n - число заданих значень x , по яким виконується сума.

ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЗРОСТАННЯ МІЦНОСТІ БЕТОНУ В ПРОЦЕСІ ТВЕРДІННЯ

4.1 ЗАСТОСУВАННЯ ПОХІДНОЇ ТА ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ РІВНЯНЬ ДО МОДЕЛЮВАННЯ

В більшості випадків елементарної функції (лінійні, експоненціальні, показникові, тригонометричні) неперервні, що дозволяє їх диференціювати та інтегрувати.

Це дає можливість визначити кращі і гірші умови протікання досліджуваного процесу або інші параметри шляхом знаходження екстремумів.

Якщо на якомусь проміжку задана функція $y = f(x)$, то границя відношення приросту функції Δy до приросту аргументу Δx при умові, що приріст аргументу прямує до нуля, називається похідною функції $f(x)$ за аргументом x .

Для похідної застосовуються такі символічні позначення:

$$y' = f'(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{\Delta x},$$

Або

$$\frac{dy}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{\Delta x},$$

Позначення $y' = f'(x)$ ввів Лагранж, а $\frac{dy}{dx}$ – Лейбніц.

За допомогою цих формул можна знайти похідну від будь-якої елементарної функції.

Якщо задана похідна $f'(x) = F(x)$, а потрібно знайти функцію $f(x)$ то така обернена до операції диференціювання операція знаходження функції за її похідною називається інтегруванням.

Функція $f(x)$ у цьому випадку називається первісною, а сукупність $f(x) + C$ всіх первісних називається невизначеним інтегралом від функції $F(x)$ і позначається так

$$\int F(x)dx = f(x) + C$$

Дане рівняння називається диференціальним рівнянням.

Звичайні рівняння мають вид:

$$I\text{-го порядку: } \frac{dy}{dx} = f(x, y) \text{ , або } f\left(x, y, \frac{dy}{dx}\right) = 0$$

$$\text{Вищого порядку: } f\left(x, y, \frac{dy}{dx}, \frac{d^2y}{dx^2}, \dots, \frac{d^ny}{dx^n}\right) = 0$$

Вирішують диференціальні рівняння інтегруванням загальним рішенням таких рівняння є сімейство кривих $F(x, y, C_1, C_2, \dots, C_n) = 0$.

Для знаходження часткового рішення мають додаткові умови, тобто задають значення функції F в деяких відомих точках

Це дозволяє визначити постійні C_1, C_2, \dots, C_n а потім знайти і часткове рішення.

Шукати рішення диференціальних рівнянь часто важко. Важко також отримати рішення в елементарних функціях і кінцевому виді.

Тому, для рішення широко використовують різні наближені методи - кінцевих різниць, розкладання у ряди та ін.

Для аналізу складних процесів (дифузія газів, теплові процеси та ін.) використовують диференціальні рівняння в частинних похідних.

$$\frac{d^2u}{dx^2} = 0; \quad \frac{du}{dt} = \frac{d^2u}{dx^2}; \quad \frac{d^2u}{dx^2} = \frac{d^2u}{dt^2} = 0 \text{ і т.д.}$$

Вирішуються вони також інтегруванням, у необхідних випадках слід звернутися до спеціальної літератури.

4.2 МОДЕЛЮВАННЯ ЗРОСТАННЯ МІЦНОСТІ БЕТОНУ В ПРОЦЕСІ ТВЕРДІННЯ

Середня швидкість зростання міцності заформованої бетонної суміші визначається як відношення зміни значення її ΔR до проміжку часу, протягом якого відбувається ця зміна.

Миттєва (істинна) швидкість зростання міцності визначається як границя середньої швидкості зростання за умови необмеженого зменшення проміжку часу, тобто

$$V = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta R}{\Delta t} = \frac{dR}{dt} \quad (4.2.1)$$

Питома швидкість зростання міцності α , яка дорівнює приросту міцності за одиницю часу з розрахунку на одиницю розрахункової міцності

$$\alpha = \frac{\Delta R}{\Delta t \cdot R_0} \quad (4.2.2)$$

Де R_0 - розрахункова міцність бетону

Таким чином, швидкість зростання міцності є похідною за часом від значення міцності, яке розглядається як функція часу, тобто

$$\frac{dR}{dt} = \alpha R \quad (4.2.3)$$

Оскільки розрахункова міцність бетону є фіксованою величиною, то швидкість зростання міцності до її розрахункового значення може бути описане злідующим рівнянням

$$\frac{dk}{dt} = \alpha R - \frac{\alpha}{R_0} \cdot R^2 \quad (4.2.4)$$

або

$$\frac{dR}{dt} = \alpha R \frac{R_0 - R}{R_0} \quad (4.2.4)$$

На відміну від рівняння (4.2.2) рівняння (4.2.4) є нелінійним.
Розділивши змінні в (4.2.4), одержимо:

$$\frac{R_0 dR}{R(R_0 - R)} = \alpha dt, \text{ яке враховуючи співвідношення}$$

$$\frac{1}{R(R_0 - R)} = \frac{1}{\alpha R} + \frac{1}{R_0(R_0 + R)}, \text{ запишемо у такому виді:}$$

$$\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_0 - R} \right) dR = \alpha dt$$

Після інтегрування одержимо:

$$\int \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_0 - R} \right) dR = \int \alpha dt + A,$$

$$\ln R - \ln(R_0 - R) = \alpha t + \ln a, \text{ або}$$

$$\ln \frac{R}{R_0 - R} = \alpha t + \ln a, \text{ де } A = \ln a$$

Після потенціювання останнього рівняння маємо:

$$\frac{R}{R_0 - R} = a \cdot e^{\alpha t} \quad (4.2.5)$$

Розв'язуючи рівняння (4.2.5) відносно R , знайдемо шукану функцію
 $R = f(t)$

$$R = \frac{R_0 \cdot e^{\alpha t}}{1 + a \cdot e^{\alpha t}} \quad (4.2.6)$$

Якщо відомо, що на початковому відрізку часу Δt_{II} відбувається
приріст міцності бетону на ΔR_{II} , то

$$\alpha = \frac{\Delta R_{II}}{\Delta t_{II} \cdot R_0}, \text{ а вираз (4.2.5) набуває виду:}$$

$$\frac{R}{R_0 - \Delta R} = a \cdot e^{\frac{\Delta R_{II}}{\Delta t \cdot R_0} \cdot t}, \text{ звідки}$$

$$a = \frac{\Delta R_{II}}{(R_0 - \Delta R) \cdot e^{\frac{\Delta R_{II}}{\Delta t \cdot R_0} \cdot t}} \quad (4.2.7)$$

Моделювання зростання міцності бетону на етик після формування

Якщо відома питома швидкість зростання міцності « α », яка дорівнює приросту міцності за одиницю часу з розрахунку на одиницю розрахункової міцності R_0 :

$\alpha = \frac{\Delta R}{\Delta t \cdot R_0}$, то швидкість зростання міцності може бути описана наступним диференціальним рівнянням:

$$\frac{dR}{dt} = \alpha R \quad (4.2.8)$$

Якщо розглядати питому швидкість зростання міцності α як змінну величину, то модель необхідно замінити на таку:

$$\frac{dR}{dt} = \alpha(t) R \quad (4.2.9)$$

Будемо вважати, що α лінійно залежить від значення міцності, тобто

$$\alpha = b - aR,$$

Де $b = \alpha_0$, $a = \frac{\alpha_0}{R_0}$, де R_0 – розрахункова міцність бетону. Тоді

$$\alpha = \alpha_0 - \frac{\alpha_0}{R_0} \cdot R, \text{ а вираз набуває виду}$$

$$\frac{dR}{dt} = \left(\alpha_0 - \frac{\alpha_0}{R_0} \right) \cdot R = \alpha_0 R - \frac{\alpha_0 R^2}{R_0} = \alpha_0 \left(1 - \frac{R}{R_0} \right) R, \text{ або}$$

$$\frac{dI}{dt} \cdot R - \frac{dR}{dt} \cdot \frac{R^2}{R_0} = 0$$

Приведемо вираз до більш простого виду за допомогою заміни змінних:

$$R = R_6 \cdot \tau = \frac{\tau}{\alpha_0} \quad (4.2.10)$$

Тоді

$$\frac{R_0 \, dB \cdot \alpha_0}{d\tau} = \alpha_0 \cdot B_0 \cdot B - \frac{\alpha_0}{R_6} \cdot R_6^2 \cdot B^2 \quad (4.2.11)$$

Після скорочення на $\alpha_0 \cdot B_0$, отримаємо:

$$\frac{dB}{dt} = B - B^2 \quad (4.2.12)$$

Розділимо змінні: $\frac{dB}{B-B^2} = -\alpha t$ або $\frac{dB}{B(1-B)} = -\alpha t$

$$\int \frac{dB}{B} - \int \frac{dB}{1-B} = -\tau + C$$

Після потенціювання

$$\ln B - \ln(1-B) = -\tau + C,$$

або

$$\ln \frac{B}{1-B} = -\tau + C \quad (4.2.13)$$

$B = B_0$ при $\tau = 0$, ($B = \frac{R}{R_6}$, $\tau = \alpha_0 t$), $C = \ln \frac{B_0}{1-B_0}$, тоді

$$\frac{B}{1-B} = e^{\ln \frac{B_0}{1-B_0} - \tau} = \left| \frac{B}{1-B_0} \right| \cdot e^{-\tau} \quad (4.2.14)$$

Позначимо $\frac{B}{1-B_0} = A$, тоді $\frac{B}{1-B_0} = A \cdot e^{-\tau}$

$$B = A \cdot e^{-\tau} - B \cdot A \cdot e^{-\tau} \quad (4.2.15)$$

$$B = \frac{A \cdot e^{-\tau}}{1 - A \cdot e^{-\tau}}, \text{ або } B = \frac{\left| \frac{B}{1-B_0} \right| \cdot e^{-\tau}}{1 - \left| \frac{B}{1-B_0} \right| \cdot e^{-\tau}} = \frac{\frac{B}{1-B_0}}{\frac{1-B_0}{1-B_0} + e^{-\tau}} \quad (4.2.16)$$

$$B = \frac{R}{R_6} \cdot \tau = \frac{\frac{B}{1-B_0}}{\frac{1-B_0}{1-B_0} + e^{-\tau}} \cdot R_6, \text{ при } \tau = \alpha_0 t \quad (4.2.17)$$

У наступних розділах приводиться перевірка математичної моделі 4.2.6.

5. ВЕРИФІКАЦІЯ РОЗРОБЛЕНОЇ МОДЕЛІ

5.1 Характеристика вихідних матеріалів

Властивості і якість вихідних матеріалів для приготування бетонної суміші - в'язучого, великого і дрібного заповнювача, добавок - мають вирішальне значення у формуванні властивостей бетонної суміші з затверділого бетону, впливають на технологію та техніко-економічні показники виробництва виробів. Їм основні властивості та характеристики зазначених матеріалів, їх раціональна область застосування суворо регламентується відповідними ДСТУ, технічними умовами та іншими нормативними документами. З кожним роком розширюється і вдосконалюється номенклатура і властивості матеріалів для приготування бетонної суміші.

Перш ніж приступить до визначення складу бетонної суміші необхідно провести випробування вихідних матеріалів за стандартною методикою і отримати наступні характеристики:

- для цементу - активність і истинну щільність, масинну щільність, нормальну густоту цементного тіста;
- для заповнювачів - дійсну густину, пустотність і зерновий склад найбільшої крупності частинок заповнювача, вологість; при використанні фракціонованого щебеню встановлюємо оптимальне співвідношення між фракціями забезпечуючи найменшу пористість суміші фракцій. [1].

5.1.2 Характеристика в'язучого (цемент)

Цемент перевіряємо на відповідність вимогам ДСТУ Б В.2.7-46:2010 «Будівельні матеріали. Цементи загально - будівельного призначення. Технічні умови».

В даній дипломній роботі використано порландцемент ПЦ ІІ / Б-Ш-400 [5]. Потрібні характеристики даного в'язучого приведені нижче в таблиці 5.1

Таблиця 5.1. Характеристики в'язучої речовини.

№ п/п	Найменування показників	Результати випробувань
1	Насипна густина	
2	Істинна густина	
3	Активність цементу (28 діб)	

5.1.3 Характеристика заповнювачів

Щебінь. Щебінь перевіряємо на відповідність вимогам ДСТУ Б В.2.7.-75-98 "Щебінь і гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкції і робіт. Технічні умови" [6].

Використовую щебінь м. Кременчук (2). Характеристики подані нижче. (Табл.5.2)

Таблиця 5.2. Характеристика крупного заповнювача.

№ п/п	Найменування показників	Результати випробувань
1	Насипна густина	
2	Істинна густина	
3	Фракція, мм	
4	Пустотність	
5	Вологість	

Пісок. Пісок перевіряємо на відповідність вимогам ДСТУ Б В.2.7- 32-95 "Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів конструкції і виробів. Технічні умови".[7].

Використовую пісок річковий м. Полтава (2). Характеристики подані нижче (Табл.5.3)

Таблиця 5.3. Характеристика дрібного заповнювача.

№ п/п	Найменування показників	Результати
1	Насипна густина	
2	Істинна густина	
3	Модуль крупності	
4	Вологість	

5.2 Розрахунок складу бетону.

Розрахунково-експериментальні методи визначення складу бетонної суміші, які отримали найбільше поширення передбачає 2 стадії. Перша - орієнтовний розрахунок основних параметрів складу суміші з використанням ряду емпіричних залежностей, математичних моделей, таблиць та графіків, отриманих в результаті накопичення і обробки результатів численних експериментальних досліджень, а також інструкції та рекомендації. Друга стадія - експериментальна перевірка та уточнення отриманих розрахунків параметрів складу.

Для ширшого розкриття питання діломної роботи, було розраховано 3 склади бетонної суміші різної марги - В10, В15 та В20. Деталі вказані на рис.5.2.1, рис 5.2.2 та рис. 5.2.3 відповідно.

Рис. 5.2.1 Розрахунок складу бетону для класу B10 (129 кгс/см²)

Рис. 5.2.1 Розрахунок складу бетону для класу B15 (193 кгс/см²)

Рис. 5.2.1 Розрахунок складу бетону для класу B20 (257 кгс/см²)

5.3 Методика експерименту

Експериментальне дослідження виконувалось на бетонних зразках – призмах з розмірами $10 \times 10 \times 10$ см. Всього було виготовлено 3 серії зразків, котрі відрізнялись складом бетонної суміші, виготовлялись у формах з ДСП в умовах ,близьких до заводських.

Рис. 5.3.1 Зразки - куби бетонні класів В10, В15 та В20.

Склад бетону підібрано варіюванням вагових відношень компонентів і з урахуванням фактору: стрімання класів бетону в першій ,другій та третій В10, В15 та В20 відповідно. Всього було виготовлено 105 зразків, по 35 зразків на кожен клас бетону [15]. (Рис. 5.3.1).

Після виготовлення зразки зберігались при лабораторній температурі 28 діб. Через певні проміжки часу (3 - 4 доби) зразки піддавалися випробуванням на стиск на гідралічному пресі ПГ-100 в процесі котрих визначались міцнісні характеристики стики бетону кожної серії [15].

5.4 Результати експерименту.

По кубиковій міцності виявлені класи бетону В10, В15 та В20 відповідно. Дані вимірів наведено в таблиці (табл 5.4.1)

Таблиця 5.4.1 Гранітні міцності на стиск бетонних зразків-кубів.

День	Клас бетону	Площа поверхні, $S_{\text{пов.}}$, см^2	Границя міцності на стиск по манометру ПГ-100, R_0 ,	Границя міцності на стиск, $R = \frac{F}{S_{\text{пов}}}$, кгс/см^2	Середня границя міцності на стиск, $R_{\text{ср.}}$, кгс/см^2
7					
7					
7					
10					
10					

Продовження таблиці 5.4.1

11				
14				
14				
14				
17				
18				
17				
21				

21				
21				
24				
24				
24				
28				
28				
28				

По формулі 4.2.6 вираховані теоретичні дані графіку зростання міцності бетону в процесі твердіння. Розрахунок нижче є основою всього випробування. Ввівши дані випробувань з 7-й день отримаємо теоретичні дані графіків зростання міцності бетону.

З розрахунку класу бетону В10 відомо, що через 28 діб бетон набуває міцності $R_6 = 129 \text{ кгс/см}^2$, а за 7 днів бетон набув $\Delta R = 73,81 \text{ кгс/см}^2$, тоді

$$\alpha = \frac{\Delta R}{\Delta t \cdot R_6} = \frac{73,81}{7 \cdot 129} = 0,0817;$$

$$a = \frac{\Delta R}{(R_6 - \Delta R) \cdot e^{\alpha \cdot t}} = \frac{73,81}{(129 - 73,81) \cdot e^{0,0817 \cdot 7}} \approx 0,7546$$

Міцність бетону В10 через 7 днів за формулою:

$$R/t = 7 = \frac{a \cdot R_6 \cdot e^{\alpha t}}{1 + a \cdot e^{\alpha t}} = \frac{0,7546 \cdot 129 \cdot e^{0,0817 \cdot 7}}{1 + 0,7546 \cdot e^{0,0817 \cdot 7}} \approx 73,81 \text{ кгс/см}^2$$

Міцність бетону В10 через 28 днів за формулою:

$$R/t = 28 = \frac{a \cdot R_6 \cdot e^{\alpha t}}{1 + a \cdot e^{\alpha t}} = \frac{0,7546 \cdot 129 \cdot e^{0,0817 \cdot 28}}{1 + 0,7546 \cdot e^{0,0817 \cdot 28}} \approx 129,72 \text{ кгс/см}^2$$

З розрахунку класу бетону В15 відомо, що через 28 діб бетон набуває міцності $R_6 = 193 \text{ кгс/см}^2$, а за 7 днів бетон набув $\Delta R = 126,42 \text{ кгс/см}^2$, тоді

$$\alpha = \frac{\Delta R}{\Delta t \cdot R_6} = \frac{126,42}{7 \cdot 193} = 0,093;$$

$$a = \frac{\Delta R}{(R_6 - \Delta R) \cdot e^{\alpha \cdot t}} = \frac{126,42}{(193 - 126,42) \cdot e^{0,093 \cdot 7}} \approx 0,9862$$

Міцність бетону В15 через 7 днів за формулою:

$$R/t = 7 = \frac{a \cdot R_6 \cdot e^{\alpha t}}{1 + a \cdot e^{\alpha t}} = \frac{0,9862 \cdot 193 \cdot e^{0,093 \cdot 7}}{1 + 0,9862 \cdot e^{0,093 \cdot 7}} \approx 126,42 \text{ кгс/см}^2$$

Міцність бетону В15 через 28 днів за формулою:

$$R/t = 28 = \frac{a \cdot R_6 \cdot e^{\alpha t}}{1 + a \cdot e^{\alpha t}} = \frac{0,9862 \cdot 193 \cdot e^{0,093 \cdot 28}}{1 + 0,9862 \cdot e^{0,093 \cdot 28}} \approx 179,73 \text{ кгс/см}^2$$

З розрахунку класу бетону В 20 відомо, що через 28 діб бетон набуває міцності $R_6 = 257 \text{ кгс/см}^2$, а за 7 днів бетон набув $\Delta R = 130,31 \text{ кгс/см}^2$, тоді

$$\alpha = \frac{\Delta R}{\Delta t \cdot R_6} = \frac{130,31}{7 \cdot 257} = 0,072;$$

$$a = \frac{\Delta R}{(R_6 - \Delta R) \cdot e^{\alpha t}} = \frac{130,31}{(257 - 130,31) \cdot e^{0,072 \cdot 7}} \approx 0,6194$$

Міцність бетону В 20 через 7 днів за формулою:

$$R/t = 7 = \frac{a \cdot R_6 \cdot e^{\alpha t}}{1 + a \cdot e^{\alpha t}} = \frac{0,6194 \cdot 257 \cdot e^{0,072 \cdot 7}}{1 + 0,6194 \cdot e^{0,072 \cdot 7}} \approx 130,31 \text{ кгс/см}^2$$

Міцність бетону В 20 через 28 днів за формулою:

$$R/t = 28 = \frac{a \cdot R_6 \cdot e^{\alpha t}}{1 + a \cdot e^{\alpha t}} = \frac{0,6194 \cdot 257 \cdot e^{0,072 \cdot 28}}{1 + 0,6194 \cdot e^{0,072 \cdot 28}} \approx 211,97 \text{ кгс/см}^2$$

За цими даними було розраховано теоретичне зростання міцності на кожен день. Дані внесені в таблицю 5.4.2.

Таблиця 5.4.2 Теоретичні дані зростання міцності бетону

День	Клас бетону, середня границя міцності на стиск, $R_{сер.}$, кгс/см ²		
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			

За допомогою MS Office Excel було створено графіки теоретичного прогнозування зростання міцності бетону в процесі твердіння (рис. 5.4.1).

Рис. 5.4.1 Графіки теоретичного прогнозування зростання міцності бетону В 10, В 15 та В 20 в процесі твердіння.

По закінченню строків витримування бетонних зразків 3-х серій, було введено дані випробувань за 28 діб. Результати теоретичних (рис. 5.4.1) та експериментальних (табл. 5.4.1) даних вказані на рисунках 5.4.2, 5.4.3 та 5.4.4.

День	Графіки міцності на стиск, $R_{ст}$, кгс/см ²		Відхилення, %
	Теоретична	Експериментальна	
7			
10			
14			
17			
21			
24			

Рис. 5.4.2 Графік теоретичного прогнозування та експериментальних даних зростання міцності бетону В 10 в процесі твердіння

День	Границя міцності на стиск, $R_{сер.}$ МПа/см ²		Відхилення, %
	Теоретична	Експериментальна	

Рис. 5.4.3 Графік теоретичного прогнозування та експериментальних даних зростання міцності бетону В 15 в процесі твердіння

День	Границя міцності на стиск, $R_{сер}$, кгс/см ²		Відхилення, %
	Теоретична	Експериментальна	
7			
11			
14			
18			
21			
24			
28			

Рис. 5.4.4 Графік теоретичного прогнозування та експериментальних даних

Експериментальні дані
 Ця лінія вказує

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

6.1. Охорона природного довкілля

При роботі з бетонними основним забрудником являється -цементний пил, тому у виробництві використовуються рясні фільтри [19].

Запилене повітря від аспіраційних і технологічних систем перед викидом в атмосферу піддається очищенню від пилу в циклонах і рукавних фільтрах з високою ефективністю очищення. Пил, уловлений в циклонах і рукавних фільтрах, повністю використовується у виробництві.

6.2. Охорона праці і техніка безпеки

Для створення необхідних санітарно-гігієнічних і безпечних умов праці передбачена [19]:

- максимальна механізація і автоматизація технологічних процесів, пов'язаних з організацією складування і підготовкою сировини, його класифікацією, транспортування матеріалів, що порошати;

- розрахунок освітлення робочих місць згідно ДБН В.2.5-28-2006 "Природне і штучне освітлення" [20].

В лабораторії основними виробничими негативними факторами являється - пил цементу.

- обігрів робітників складу в зимовий час передбачається у відгородженому від складу опалюваному виробничому корпусі,

- для усунення виділення пилу в повітря робочої зони, передбачені укриття вузлів пересипок і їх устаткування місцевими відсмоктуваннями і очищенням забрудненого повітря, що видаляється в циклонах і фільтрах.

Через чому пил повністю утилізувався;

Електробезпека технологічного устаткування і автоматики відповідає вимогам "Правил облаштування електроустановок".

Для виробничих агрегатів передбачені автоматика безпеки, автоматичне регулювання, контроль і сигналізація необхідних параметрів, а також автоматичний, дистанційний і місцевий режим управління виконавчими органами.

Автоматика безпеки передбачають задану послідовність операцій. При виникненні аварійних режимів передбачено відключення агрегатів із забезпеченням світлозвукової сигналізації.

Е діях попередження забруднення повітря приміщень з шкідливими виділеннями:

- устаткування, прилади, трубопроводи і інші джерела, що виділяють теплоту, мають бути теплоізовані;
- агрегати і устаткування, при експлуатації яких відбувається виділення вологи, мають бути вкриті і ізовані;
- технологічні процеси, пов'язані з виділенням пилу, слід ізувати так, щоб їх робота здійснювалася без участі людей, а технологічні викиди, що виділяються, перед викидом в атмосферу мають бути піддані очищенню.

У лабораторії, де використовуються вібраційні механізми, мають бути прийняті заходи по усуненню вібрації і зниженню рівня шуму.

Рівень шуму на робочих місцях не повинен перевищувати допустимі межі, інакше необхідно влаштовувати звукову і вібраційну ізоляцію приміщень, робочих місць і машин, наприклад установку вібромайданчиків на масивні фундаменти, ізовані від підлоги гнучкими накладками, установку машин з вібраторами на пружинні або гумові віброізулятори, обов'язкове кріплення форм на вібромайданчику і ударний стіл, укриття вібромайданчиків акустичними кожухами, облицювання щілин

звукопоглинальним матеріалом, своєчасний профілактичний огляд, ремонт і наладка вібраційний устаткування. Робітники повинні використати взуття на товстій підошві з губчастої гуми, протишумові навушники, рукавиці з прокладкою пінопласту.

Концентрація пилу в приміщеннях нормується залежно від змісту вільного кремнезему в повітрі робочої зони, особливо повинна приділятися увага приміщенням, де в зваженому стані знаходяться цемент, вапно та ін.

В якості індивідуального захисту в приміщеннях з великою концентрацією пилу необхідно користуватися респіратором типу - Ф-45 або ПРБ-1, герметичними захисними окулярами або спецодягом.

3.3 Заходи з техніки безпеки

Заходи з техніки безпеки під час роботи

А) на приладі для визначення тондри помелу:

1. До роботи на обладнанні допускаються лаборанти та учбові майстри, які пройшли спеціальну підготовку, які досягли 18 років та мають посвідчення на право роботи.

2. Категорично забороняється включення та робота на механізмах студентам.

Перед початком роботи:

1. Одягнути спеціальний одяг і перевірити наявність гумових килимків біля обладнання, де повинні проводитися роботи.

2. Провести зовнішній огляд устаткування на колісному ході, перевірити роботу устаткування.

3. Перевірити наявність і надійність кріплення заземлення до основного контуру.

В процесі роботи:

1. Прилад встановлюється на цегельному або бетонному фундаменті і кріпиться болтами.
2. При первинному запуску приладу, щоб уникнути поломки двигуна штовхача обмежувальну прокладку перевірити, чи збігається напрямок обертання мотора зі стрілкою на приладі.
3. Після закінчення роботи приладу потрібно ретельно очистити від піску і протерти насухо.

Прилад повинен бути заземлений.

Б) з віброплощадкою:

До експлуатації виброплощадки лабораторної можуть бути допущені лаборанти 4 розряду, які вивчили будову та правила експлуатації виброплощадки лабораторної, які пройшли курсове навчання з безпечних прийомів і методів праці, склали іспити в кваліфікованій комісії та отримали посвідчення на право роботи та мають першу кваліфікаційну групу з техніки безпеки Згідно «Правил техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів».

Експлуатація та ремонт електрообладнання виброплощадки повинні проводитися відповідно до «Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів».

Управління виброплощадкою (включення і відключення) здійснюється дистанційно з спускового пристрою, дозволяє виконувати пуск електродвигуна вибратора і його автоматичне вимикання через певний час або забезпечувати його тривалу роботу (включення і відключення) проводиться вручну.

При роботі виброплощадки лабораторної:

- робоче місце повинно бути освітлене відповідно до будівельних норм;

- забороняється включати вібромайданчик лабораторний з незакріпленими формами;
- забороняється працювати з відкритими кришками вібратора;
- забороняється обслуговуючому персоналу під час роботи доторкатися віброуючих частин (стола, форми, вібратора і т.п.);

При технічному обслуговуванні і поточному ремонті віброплощадки лабораторної:

- не дозволяється здійснювати будь-який огляд чи ремонт при включеній віброплощадки лабораторної в зовнішню мережу напруги;
- перевірити надійність закріплення форм;
- включити віброплощадку в натиснувши кнопку «пуск»;
- не підходити радіше повної зупинки віброплощадки;
- відключення автоматичнее. Але у випадку несправності натиснути червону кнопку виключення;

В) з розчиномішувачем:

силовий кабель електроживлення повинен бути захищений від випадкових пошкоджень.

Гезпосереднє дотикання кабелів з гарячими та масними поверхнями не дозволяється.

Категорично забороняється працювати при:

- Пошкодженні силового кабелю електроживлення,
- появі диму і запаху характерного для ізоляції, яка горить;
- Пошкодження паса клинського;
- Пошкодження механізму кріплення чаші;
Знятому захисному кожуху;
- Відсутності змазки на шестерні приволу та вінцевій шестерні;
- Підвищеному шумі, гуркоті, вібрації;
- Відкритому пульті керування;

- Тріщині в корпусі електродвигуна;
- Відсутності індивідуальних засобів захисту оператора

Під час роботи з розчинозмішувачем необхідно слідкувати за станом кабелів електроживлення, не давати змоги йому скручуватись та різко перегинатись.

Необхідно слідкувати, щоб бризки води або розчину не потрапили на електродвигун та кришку електрообладнання.

Оператору рекомендується користуватися захисними окулярами.

При очищенні від застиглого розчину вдаряти тільки по дніщу знятої чаші.

До експлуатації розчинозмішувача повинні допускатися особи не молодше 18 років, які пройшли інструктаж та перевірку знань згідно з НПАОП 0.004.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання та перевірки знань з питань охорони праці»:

Г) з бетонозмішалкою [21]:

- не перевантажувати бетонозмішувач.

Не використовувати бетонозмішувач, якщо не працює клавіша «включення / вимикання» («ON / OFF»). Бетонозмішувач, в якому несправна клавіша «включення / вимикання» («ON / OFF»), становить підвищену небезпеку і повинен бути відремонтований до початку роботи [21].

- від'єднати вилку від джерела електроживлення перед проведенням будь-яких регулювань, заміни аксесуарів або приладдя, або при зберіганні бетонозмішувача.

Вчасно проводити необхідне обслуговування бетонозмішувача. Належним чином утримувати бетонозмішувач дозволяє більш легко і якісно

виконувати роботу і підвищує безпеку. Будь-яка зміна або модифікація забороняється.

- регулярно перевіряти регулювання бетонозмішувача, а також відсутність деформацій робочих частин, поломки частин, а також стану бетонозмішувача, які можуть впливати на неправильну роботу.

- перед включенням перевірити, чи відповідає напруга живлення бетонозмішувача мережевій напрузі; перевірте справність кабелю, штепселі і розетки, в разі несправності цих частин подальша експлуатація забороняється

- якщо використання бетонозмішувача у вологих місцях неминуче, струм до бетонозмішувача повинен подаватися через спеціальний пристрій - переривник, що відключає бетонозмішувач при витокі струму.

- не піддавати бетонозмішувач впливу дощу або вологим умом зам

- ніколи не використовуйте шнур, щоб витягнути штепсель з розетки. Тримати шнур подалі від високої температури, масляних рідин, гострих граней або рухомих частин.

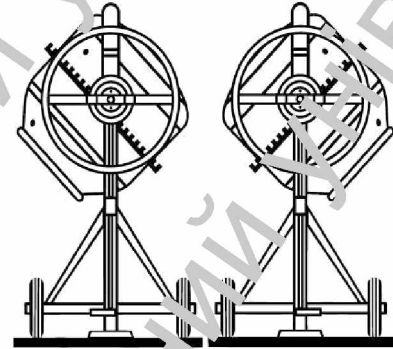
- при роботі бетонозмішувача поза приміщеннями, використовувати електроподовжувач, спеціально призначений для застосування поза приміщенням.

- не використовувати бетонозмішувач в той час, як Ви стомлені або знаходитеся під дією ліків або засобів, які уповільнюють реакцію, а також алкоголю або наркотичних речовин.

- носити відповідний одяг. Руки повинні бути сухими, чистими і вільними від слідів маслянистих речовин.

- уникати раптового включення. Переконайтеся, що клавіша «включення / вимкнення» («ON / OFF») знаходиться в положенні «вімкнено» («OFF») до влучення бетонозмішувача в розетку.

- завжди носіть захисні окуляри, респіратор, нековзні безпечні черевики, каска, або навушники повинні використовуватися для відповідних умов.



Підготовка змішувача до роботи та порядок роботи

При підготовці бетонозмішувача до роботи необхідно перевірити застосування всіх нарізних сполучень, справність електро провладу та правильність підключення, встановити бетонозмішувач на рівну й тверду поверхню, кут нахилу повинен становити не більше 5 градусів, підключити кабель живлення до розетки з заземленням.

Переконатися в справності змішувача, випробувати його роботу на холостому ході й тільки після цього приступати до роботи.

Робота змішувача має циклічний характер з такою послідовністю: завантаження, змішування, вивантаження. Рекомендується вилучення змішувача при вертикальному положенні.

Завантаження барабана здійснюється вручну. При готуванні розчину (мал. 6.3.1) треба влити частину води, потім всипати цемент, пісок і іншу частину води. Кут нахилу барабана до горизонталі під час змішування повинен становити не більше 45 градусів. Час змішування становить 60-180 секунд.

При готуванні бетонової суміші (мал. 6.3.2) треба влити частину води, всипати щебінь, потім всипати цемент, пісок і воду. Кут нахилу барабана до

горизонталі під час змішування повинен становити не більше 35 градусів.
Час змішування становить 60-180 секунд.

Вивантаження готової суміші здійснюється при обертовому барабані шляхом нахилу його горлослиною вниз (мал. 6.3.3).

Після вивантаження суміші барабан повертається в положення завантаження, і цикл повторюється.

Мал.6.3.2 Приготування
бетоної суміші

Мал.6.3.3 Вивантаження

Одразу ж після закінчення роботи ретельно промити барабан водою всередині та зовні. Після промивання поверніть барабан догори дном та лишити його в такому положенні (мал. 6.3.4)

Одразу ж після закінчення роботи ретельно промити барабан водою всередині та зовні. Після промивання повернути барабан догори дном та

Мал.6.3.4 Зберігання

лишити його в такому положенні.

Попередження: не допускається бити по барабану для його очищення.

Навантаження, що рекомендується, на бетонозмішувач, становить максимум 75% за годину в д часу роботи: дотримуючи цієї рекомендації

Перед очищенням вимкнути бетонозмішувач з електромережі.

У щозмінне обслуговування входить:

- після закінчення робочої зміни очищати бетонозмішувач зсередини й зовні від залишків суміші, стежачи за тим щоб вода не потрапила на електродвигун.

- категорично забороняється проодити очищення бетонозмішувача постукуванням молотка, дерев'яним ціпком або іншими твердими предметами, тому що це може привести до розгерметизації з'єднання корпуса;

- періодично змазуйте консистентним змащенням вузли, що мають маслянку.;

Діа на пресі ПГ- 100 :

1) До роботи на обладнанні допускається лаборанти та учбовий майстер, які пройшли медогляд та спеціальну підготовку досягнули 18 річного віку та мають свідоцтво на право роботи;

2)Перед початком роботи:

- надати спецодяг і перевірити наявність гумових килимків біля обладнання не повинні проводитися лабораторні роботи;
- провести зовнішній огляд обладнання;
- перевірити роботу обладнання без завантаження;
- приступити до роботи;

під час роботи:

- перед початком роботи переконатися у повній справності преса;
- спочатку необхідно увімкнути рубильник, відкрити клапан випуску повітря, включити електродвигун насоси та чил. вимірювача;
- показником справності машин являється те, що при русі рухомих частин вгору і вниз робоча стрілка повинна залишитися на 0;
- якщо знайдені ненормальності у роботі установки, не розпочинати роботи, вилучити дефект.

6.4 Протипожежна безпека

Виробництво бетонної суміші (бетону) не пожаро- і не вибухонебезпечно і належить до категорії " Д" (Негорючі рідини і матеріали у холодному стані).

Основними причинами пожежі в лабораторії можуть бути:

- необережне поводження з вогнем (в т.ч. куріння);
- порушення правил пожежної безпеки при експлуатації та монтажу ел.устатковок та ел. проводки,
- порушення технологічного процесу та інші причини.

Студенти,які виконують роботу, а також особи, які приймають безпосередню участь у виробничому процесі мусять пройти вхідний протипожежний інструктаж. Інструктаж проводиться по програмам для проведення вступного інструктажу, затвердженого приказом директора та справжньою інструкцією. Повторний інструктаж про заходи пожежної безпеки проводиться з усіма працівниками не менше одного разу в рік.

За порушення вимог пожежної безпеки, створенню перешкод для діяльності органів державного пожежного нагляду, невиконання їх предписань, погашення нанесених збитків та затрат несуть посадові особи та інші робітники в порядку, встановленому діючим законодавством.

Основні вимоги пожежної безпеки:

- Евакуаційні шляхи та виходи повинні бути вільними, не загороджені та у випадку виникнення пожежі забезпечувати безпеку під час евакуації людей, які знаходяться у приміщенні;
- за наявності людей у приміщенні двері евакуаційних виходів можуть запиратися лише на внутрішні, легко відкриваючі запори;
- куріння дозволяється у спеціально обладнаному для цього місці.
- для куріння устанавлюються приказом директора, де встановлена урна з негорючих матеріалів;
- Приміщення повинно своєчасно прибиратись від горючого сміття, відходів та постійно підтримуватись у чистоті. Щоденно сміття та відходи виносяться з приміщення на сміттєзбиральник;
- Розстановку обладнання (бетономішалка, форми) необхідно виконувати таким чином, щоб вона не перешкоджала вільній евакуації людей під час пожежі;
- Зварювальні та інші вогневі роботи у приміщенні проводяться після оформлення наряду-допуску на проведення цих робіт. Проведення вогневих робіт допускається лише після прийнятих мід, виключаючих можливість виникнення пожежі: очистки робочого місця від горючих матеріалів, захисту горючих конструкцій, забезпечення первинними засобами пожежотушіння (вогнегасником, ящиком з піском та лопатою, відром з водою);
- забороняється експлуатація кабелів та проводів з пошкодженими захисними здібностями ізоляцією;
- забороняється користування пошкодженими розетками, з'єднувальними коробками, а також лампами, скло яких мають сліди потьмарення або випуклості;
- в усіх, незалежно від призначення приміщення, котрі після закінчення роботи закриваються та не контролюються черговим персоналом, на УСІХ електроустановках та електроприладах, а також у мережі їх

живлення повинна бути відключеною напруга (за винятком чергового освітлення, протипожежних та охоронних установок).

Протипожежний захист забезпечується: використанням засобів гасіння пожежі та пожежної техніки, автоматичних установок пожежної сигналізації та пожежогасіння, будівельних конструкцій, об'єктів з регламентованими межами вогнестійкості, пристроями, що забезпечують обмеження розповсюдження пожежі, організацією своєчасної евакуації людей.

В лабораторії знаходяться протипожежний щит і пісок, засоби індивідуального захисту, вогнегасники, працюючі на порошку або на піні, а також відра, лопати, багри, ломи.

Лабораторія обладнана протипожежною сигналізацією для попередження виникнення пожеж. Щоб понизити ризик виникнення пожеж всі електро - двигуни в цеху заземлені. Проводять їх огляд щомісячно.

Порядок дій при пожежі:

- терміново повідомити про пожежу по телефону 112 у пожежну охорону. При цьому необхідно назвати адрес об'єкта, вказати кількість поверхів будівлі, місце виникнення пожежі, обстановку при пожежі наявність людей, а також повідомити своє прізвище;
- прийняти (по можливості) міри щодо евакуації людей, локалізації пожежі та збереженню матеріальних цінностей;
- повідомити про пожежу директора;
- за необхідності викликати інші аварійно – рятувальні служби.

За порушення вимог пожежної безпеки, створення перешкод для діяльності органів державного пожежного нагляду, невиконання їх предписань, погашення нанесених збитків та затрат несуть посадові особи та інші робітники в порядку, встановленому діючим законодавством.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Виявлені та проаналізовані процеси, що впливають на швидкість тужавлення бетону.

Зважаючи на складність процесу тужавлення та зростання міцності бетону було доведено доцільність використання математичного моделювання для опису даного процесу.

Установлено, що при відсутності апріорної інформації про зв'язок діючих факторів з швидкістю зростання міцності бетону в процесі його твердіння доцільним є використання диференціальних рівнянь.

Запропоновано логістичне диференціальне рівняння для опису швидкості зростання міцності бетону в процесі твердіння.

Експериментальна верифікація запропонованої моделі у вигляді логістичного диференціального рівняння показала на достатню збіжність експериментальних і теоретичних даних зростання міцності бетону.

Дана математична модель дозволяє прогнозувати зростання міцності бетону в процесі його твердіння.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гоц В. І., Павлюк В. В., Шилюк П. С. Бетони і будівельні розчини: підручник Київ: Основа, 2016. 568 с
2. В. Л. Гарнага, Г. Н. Дудар хіміко-термосилова технологія дрібнорозмірних бетонних виробів, с. 321.
3. Дворкін Л.Й. Будівельні розчини: навч. посібник. Київ, Каравела, 2021. 222 с
4. ДСТУ Б В.2.7-46-2010 «Будівельні матеріали. Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови».
5. ДСТУ Б.В.2.7-71-98 «Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико-механічних випробувань».
6. ДСТУ Б.В.2.7-75-98 «Щебінь і гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкції і робіт. Технічні умови».
7. ДСТУ Б В.2.7-52-95 «Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкції і робіт. Технічні умови».
8. ДСТУ Б В.2.7-232:2010 «Пісок для будівельних робіт. Методи випробувань»
9. ДСТУ Б В.2.7-215:2009 «Будівельні матеріали. Бетони. Правила підбору складу».
10. ДСТУ Б В.2.7-215:2009 «Будівельні матеріали. Бетони. Правила підбору складу».
11. ДСТУ Б В.2.7-138:2009 «Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення товщини помелу».
12. ДСТУ Б В.2.7-187:2009 «Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення міцності на згин і стиск»
13. ДСТУ Б В.2.7-114-2002 «Будівельні матеріали. Сумілі бетонні. Методи випробувань»
14. ДСТУ Б В.2.7-187:2009 «Будівельні матеріали. Цементи. Метод визначення міцності на згин і стиск»

15. ДБН В.2.5-28-2006 «Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення». - К.: Мінбуд України, 2006. - 119 с. ,
16. Інструкція з експлуатації бетону змішувача, 2012 р., ст.5-10.
17. ДБН В.1.1.7–2002 «Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва».
18. ДНАОП 0.00-4.26-96 «Положення про порядок забезпечення працівників спеціальним одягом, спеціальним взуттям та іншими засобами індивідуального захисту».
19. ПТБ Правила техніки безпеки під час експлуатування електроустановок
20. ДНАОП 0.00-4.12-05 Типовое положение про порядок проведення обучения и проверки знаний по вопросам охраны труда.
21. С.Г.Левченко, О.І. Полукаров, В. В.Зацарний, Ю. О. Полукаров, О. В. Землянська Охорона праці та цивільний захист: підручник, Київ: Снова, 2019. 472 с.