МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Центр заочної та дистанційної освіти
Кафедра будівельних, дорожніх машин і будівництва

Допустити до захисту
Зав. кафедри БДМБ
д-р техн. наук, професор
_____ В. Яцун
“___” _____ 2026 р.

Кваліфікаційна магістерська робота

на тему:

«Обґрунтування регламентів бетонування монолітних споруд у специфічних кліматичних зонах відповідно до сучасних стандартів»

Керівник: доцент кафедри БДМБ
_____ І. О. Скриннік

Консультант з охорони праці:
доцент _____ В. В. Дарієнко

Виконав: студент гр. БІ-25мз,
спеціальності G19 Будівництво
та цивільна інженерія
_____ О. С. Багалей

Кропивницький – 2026 рік

Підписано КЕП
Центральноукраїнський національний технічний університет
БАГАЛЄЙ ОЛЕКСАНДР СЕРГІЙОВИЧ
Сертифікат: 21E4B79083A82E7F04000000071CE7801892E3108
Дійсний з 26.11.2026 22:04:27 по 27.11.2027 01:59:59

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут, факультет, відділення: ЦЗДО
Кафедра будівельних, дорожніх машин і будівництва
Освітній ступінь: магістр
Спеціальність: G19 «Будівництво та цивільна інженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри БДМБ
д.т.н., проф. _____ Яцун В.В.
“___” _____ 2026 р.

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Багалею Олександру Сергійовичу

1. Тема роботи: «Обґрунтування регламентів бетонування монолітних споруд у специфічних кліматичних зонах відповідно до сучасних стандартів»
керівник роботи: Скриннік І.О., доцент,
затверджені наказом вищого навчального закладу від “10” серпня 2026 року № 25-13.
2. Строк подання студентом проекту (роботи) 25.11.2027 р.
3. Вихідні дані до роботи: ДСТУ EN 13670:2023, EN 206:2013+A2:2021, ДСТУ Б В.2.7-176:2008; кліматичні дані м. Кропивницького за ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010; керівництва ACI 305R-20, ACI 306R-16, ACI 301-20, ASTM C1074-19; бетон класу С25/30; конструкції – плита перекриття товщиною 200 мм, фундаментна плита товщиною 1,2…2,0 м.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): ВСТУП; Розділ 1 АНАЛІЗ ВПЛИВУ КЛІМАТИЧНИХ ЧИННИКІВ НА ТЕХНОЛОГІЮ МОНОЛІТНОГО БЕТОНУВАННЯ ТА НОРМАТИВНИХ ВИМОГ; Розділ 2 МЕТОДИКА ОБҐРУНТУВАННЯ РЕГЛАМЕНТІВ БЕТОНУВАННЯ; Розділ 3 РОЗРАХУНКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕГЛАМЕНТІВ; Розділ 4 РЕГЛАМЕНТИ БЕТОНУВАННЯ ТА ПРИКЛАД ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ; Розділ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ; ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ; GENERAL CONCLUSIONS; СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.
5. Перелік графічного матеріалу: мультимедійна презентація (27 слайдів).

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав (підпис, дата)	Завдання прийняв (підпис, дата)
Розділи 1–4	Скриннік І.О., доцент		
Охорона праці	Дарієнко В.В., доцент		

7. Дата видачі завдання “_10__” _____09_____ 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної магістерської роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1	Аналіз літератури та нормативних документів	вересень 2026 р.	
2	Аналіз кліматичних умов району, критерії регламентів	вересень 2026 р.	
3	Розрахункові моделі та розрахунки (розділ 3)	жовтень 2026 р.	
4	Розроблення регламентів і прикладу застосування	жовтень 2026 р.	
5	Розділ «Охорона праці»	жовтень 2026 р.	
6	Оформлення пояснювальної записки та презентації	листопад 2026 р.	
7	Перевірка на академічний плагіат, нормоконтроль	листопад 2026 р.	
8	Подання роботи на кафедру	25.11.2027 р.	

Студент _____ О. С. Багалей

Керівник роботи _____ І. О. Скриннік

ВІДОМІСТЬ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кільк. арк.	Примітка
				Документація загальна		
				Знову розроблена		
А4		1		Титульний аркуш	1	
А4		2		Завдання	2	
А4		3		Анотація	1	
А4		4		Abstract	1	
А4		5	ОБМС 25 G19 13 ПЗ	Пояснювальна записка	60	
				Зміст	1–2	
				Вступ	3	
				Розділ 1	18	
				Розділ 2	6	
				Розділ 3	14	
				Розділ 4	5	
				Розділ 5	7	
				Загальні висновки	1	
				GENERAL CONCLUSIONS	1	
				Список використаних джерел	3	
А4		6	ОБМС 25 G19 13 ІМ	Ілюстраційні матеріали (мультимедійна презентація)	27	

					ОБМС 25 G19 13 ВД		
Змн.	*Арк.*	*№ докум.*	*Підпис*	*Дата*			
Розробив		*Багалей О.С.*			*Обґрунтування регламентів бетонування монолітних споруд у специфічних кліматичних зонах Відомість кваліфікаційної магістерської роботи*	*Літ.*	*Арк.*	*Аркушів*
Перевірив		*Скриннік І.О.*				*М*	*1*	*1*
Реценз.						*ЦНТУ гр. БІ-25мз*		
Н. контр.		*Дарієнко В.В.*						
Затвердив		*Яцун В.В.*						

АНОТАЦІЯ

Багалей О. С. Обґрунтування регламентів бетонування монолітних споруд у специфічних кліматичних зонах відповідно до сучасних стандартів. – Кваліфікаційна магістерська робота. Спеціальність G19 «Будівництво та цивільна інженерія». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2026.

Пояснювальна записка містить 60 с., 30 рис., 19 табл., 30 джерел.

Мета роботи – обґрунтувати параметри регламентів бетонування монолітних конструкцій для холодного і жаркого періодів та для масивних елементів на основі сучасних стандартів і власних розрахунків для умов м. Кропивницького.

Проаналізовано вимоги ДСТУ EN 13670:2023, EN 206 і керівництв ACI 305R, 306R, 301. Методом Монте-Карло оцінено ймовірність перевищення критичної інтенсивності випаровування за місяцями теплого періоду; розраховано температуру бетонної суміші з урахуванням льоду, тривалість догляду за класами ДСТУ EN 13670 методом зрілості, мінімальне утеплення плит методом «термоса» і температурне поле масивної плити. Розроблено регламенти Х, Ж і М, алгоритм їх вибору, календар застосування для об'єкта в м. Кропивницькому та заходи з охорони праці.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МОНОЛІТНИЙ БЕТОН, ЗИМОВЕ БЕТОНУВАННЯ, ЖАРКА ПОГОДА, ДОГЛЯД ЗА БЕТОНОМ, МЕТОД ЗРІЛОСТІ, МАСИВНИЙ БЕТОН, ДСТУ EN 13670.

ABSTRACT

Bahalei Oleksandr. Justification of concreting regulations for cast-in-place structures in specific climatic zones in accordance with current standards. – Master's qualification thesis. Specialty G19 "Construction and Civil Engineering". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2026.

The explanatory note contains 60 pages, 30 figures, 19 tables and 30 references.

The aim of the work is to justify the parameters of concreting regulations for cast-in-place structures in cold and hot weather and for mass concrete elements on the basis of current standards and the author's calculations for the climate of Kropyvnytskyi.

The requirements of DSTU EN 13670:2023, EN 206 and ACI 305R, 306R and 301 are analysed. The probability of exceeding critical evaporation rates in the warm months is estimated by Monte Carlo simulation; the fresh concrete temperature with ice, the curing duration for DSTU EN 13670 curing classes by the maturity method, the minimum insulation of slabs for the thermos method and the temperature field of a mass slab are calculated. Cold weather, hot weather and mass concrete regulations, an algorithm for selecting them, an application calendar for a site in Kropyvnytskyi and occupational safety measures are developed.

KEYWORDS: CAST-IN-PLACE CONCRETE, COLD WEATHER CONCRETING, HOT WEATHER, CURING, MATURITY METHOD, MASS CONCRETE, DSTU EN 13670.

ЗМІСТ

ВСТУП 3
Розділ 1 АНАЛІЗ ВПЛИВУ КЛІМАТИЧНИХ ЧИННИКІВ НА ТЕХНОЛОГІЮ МОНОЛІТНОГО БЕТОНУВАННЯ ТА НОРМАТИВНИХ ВИМОГ 6
1.1 Поняття специфічних кліматичних умов бетонування 6
1.2 Процеси в бетоні за низьких температур 7
1.3 Процеси в бетоні за високих температур і низької вологості 9
1.4 Масивні конструкції: термонапружений стан і DEF 10
1.5 Нормативна база України та Європейського Союзу 11
1.6 Американські керівництва ACI 13
1.7 Інструментальний контроль: метод зрілості 13
1.8 Огляд експериментальних і натурних досліджень 14
Висновки до розділу 1 22
Розділ 2 МЕТОДИКА ОБҐРУНТУВАННЯ РЕГЛАМЕНТІВ БЕТОНУВАННЯ 24
2.1 Кліматичні умови району будівництва 24
2.2 Розрахункові сценарії кліматичних умов 25
2.3 Критерії переходу до спеціальних регламентів 26
2.4 Розрахункові моделі 27
Висновки до розділу 2 29
Розділ 3 РОЗРАХУНКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕГЛАМЕНТІВ 30
3.1 Інтенсивність випаровування та ризик пластичної усадки 30
3.2 Температура бетонної суміші в жаркий період 32
3.3 Тривалість догляду за методом зрілості 34
3.4 Холодний період: метод «термоса» для тонкої плити 36
3.5 Масивні конструкції 39
Висновки до розділу 3 42

					ОБМС 25 G19 13 ПЗ		
Змн.	*Арк.*	*№ докум.*	*Підпис*	*Дата*			
Розробив		*Багалей О.С.*			*Обґрунтування регламентів бетонування монолітних споруд у специфічних кліматичних зонах*	*Літ.*	*Арк.*	*Аркушів*
Перевірив		*Скриннік І.О.*				*М*	*1*	*60*
Реценз.						*ЦНТУ гр. БІ-25мз*		
Н. контр.		*Дарієнко В.В.*						
Затвердив		*Яцун В.В.*						

Розділ 4 РЕГЛАМЕНТИ БЕТОНУВАННЯ ТА ПРИКЛАД ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ 44
4.1 Структура регламенту і алгоритм його вибору 44
4.2 Регламент Х – бетонування в холодний період 45
4.3 Регламент Ж – бетонування в жаркий період 45
4.4 Регламент М – масивні конструкції 46
4.5 Приклад застосування регламентів 47
Висновки до розділу 4 48
Розділ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ 49
5.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів 49
5.2 Організація робочих місць під час бетонування 50
5.3 Розрахунок рівня шуму в зоні бетонування 50
5.4 Електробезпека під час електропрогріву бетону 51
5.5 Вентиляція тепляка з тепловою гарматою 53
5.6 Безпека в надзвичайних ситуаціях 54
Висновки до розділу 5 54
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 56
GENERAL CONCLUSIONS 57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 58

ВСТУП

Актуальність теми. Монолітний залізобетон залишається основним конструкційним матеріалом житлового, громадського та промислового будівництва в Україні. Відновлення зруйнованих об'єктів, зведення захисних споруд і нових каркасних будівель вимагає безперервного ведення бетонних робіт упродовж усього року, тобто і в холодний період, коли середньодобова температура повітря опускається нижче +5 °С, і в літні місяці, коли поєднання високої температури, низької відносної вологості та вітру спричиняє інтенсивне випаровування вологи з поверхні свіжовкладеного бетону. Окрему групу становлять масивні конструкції – фундаментні плити, ростверки, стіни захисних споруд, – у яких тепловиділення цементу саме по собі створює «специфічну кліматичну зону» всередині бетону з температурою понад 70 °С.

Після набрання чинності ДСТУ EN 13670:2023 [1] вимоги до виконання бетонних робіт в Україні переходять до європейської моделі: замість жорстких рецептурних приписів стандарт встановлює класи догляду, граничні значення та вимагає, щоб конкретні параметри було визначено в специфікації виконання для певної споруди. Це означає, що проєктувальник і виконавець повинні самостійно обґрунтувати регламент бетонування – допустимі температури суміші, тривалість і спосіб догляду, товщину утеплення, порядок контролю температури – з урахуванням кліматичних умов району та особливостей конструкції. Інженерних методик такого обґрунтування, викладених українською мовою з опорою на чинні документи, бракує, тому тема роботи є актуальною.

Мета роботи – обґрунтувати параметри регламентів бетонування монолітних конструкцій для холодного та жаркого періодів і для масивних елементів на основі аналізу сучасних стандартів (ДСТУ EN 13670, EN 206, керівництва ACI) і власних розрахунків для кліматичних умов м. Кропивницького.

Для досягнення мети поставлено такі **завдання**:

– проаналізувати вплив температури, вологості повітря та вітру на твердіння бетону і чинні нормативні вимоги України, ЄС та США щодо бетонування в особливих умовах;

– сформувати розрахункові сценарії кліматичних умов і критерії, за якими слід переходити від звичайного регламенту до спеціального;

– виконати розрахунки інтенсивності випаровування, температури бетонної суміші, тривалості догляду за методом зрілості, теплового режиму «термоса» та масивної конструкції;

– оцінити чутливість результатів до основних технологічних чинників;

– розробити регламенти бетонування для холодного, жаркого періодів і масивних конструкцій та показати їх застосування на прикладі об'єкта в м. Кропивницькому;

– розробити заходи з охорони праці під час бетонних робіт в особливих кліматичних умовах.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси бетонування та догляду за бетоном монолітних конструкцій.

Предмет дослідження – залежність параметрів регламентів бетонування від температурно-вологісних умов середовища, розмірів конструкції та складу бетону.

Методи дослідження: аналіз і порівняння нормативних документів і наукових публікацій; емпіричні залежності випаровування; рівняння теплового балансу; метод зрілості (функції Нурса–Саула та Арреніуса); модель тепловиділення цементу; чисельне розв'язання одновимірного рівняння теплопровідності методом скінченних різниць; статистичне моделювання методом Монте-Карло; аналіз чутливості.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що для кліматичних умов м. Кропивницького методом Монте-Карло оцінено ймовірність перевищення критичних значень інтенсивності випаровування за місяцями теплого періоду, а також за єдиною розрахунковою схемою (зрілість + тепловиділення) отримано залежності тривалості догляду, мінімальної товщини

утеплення та максимальної температури масивного бетону від температури середовища, що дало змогу пов'язати класи догляду ДСТУ EN 13670 з конкретними кліматичними умовами.

Практичне значення полягає в розроблених регламентах Х, Ж і М у вигляді таблиць граничних значень і заходів, алгоритмі вибору регламенту та календарі заходів для будівельного майданчика, які можуть бути використані під час розроблення проєктів виконання робіт і специфікацій виконання за ДСТУ EN 13670.

Апробація результатів. Основні результати роботи представлено на міжнародній науково-технічній онлайн-конференції «Наука, інженерія та технології: сучасні виклики й перспективи» (Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, 24–25 листопада 2026 р.).

Структура роботи. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, загальних висновків англійською мовою та списку використаних джерел. Обсяг пояснювальної записки – 60 сторінок, у тому числі 30 рисунків, 19 таблиць, список джерел із 30 найменувань.

Розділ 1
АНАЛІЗ ВПЛИВУ КЛІМАТИЧНИХ ЧИННИКІВ НА ТЕХНОЛОГІЮ МОНОЛІТНОГО БЕТОНУВАННЯ ТА НОРМАТИВНИХ ВИМОГ

1.1 Поняття специфічних кліматичних умов бетонування

Під специфічними (особливими) кліматичними умовами бетонування розуміють такий стан навколишнього середовища, за якого звичайна технологія – укладання суміші заводської температури та догляд шляхом укривання плівкою – не гарантує досягнення бетоном проєктних властивостей. Нормативні документи розрізняють три основні групи таких умов: низькі температури (холодний, або зимовий, період), високі температури в поєднанні з низькою вологістю та вітром (жаркий період) і внутрішні температурні умови масивних конструкцій [2, 3, 4].

Технологічні наслідки обох «зовнішніх» груп протилежні за знаком, але подібні за механізмом: температура керує швидкістю гідратації цементу, а вологісний режим – тим, чи вистачить води для гідратації в поверхневому шарі. За низьких температур гідратація сповільнюється, а замерзання води в ранньому віці руйнує структуру, що формується. За високих – гідратація прискорюється, суміш швидше втрачає рухливість, зростає водопотреба, а випаровування з відкритої поверхні спричиняє пластичну усадку та тріщини ще до початку тужавлення [5, 6].

Для території України характерні обидві групи умов. Помірно-континентальний клімат має холодний період тривалістю 4–5 місяців і літні місяці з денними температурами 28–35 °С, низькою вологістю в південних і центральних областях та частими вітрами. До цього додаються масивні елементи, частка яких зростає у зв'язку з будівництвом захисних споруд цивільного захисту за ДБН В.2.2-5:2023 [7].

Загальну класифікацію особливих умов бетонування та чинників, що їх визначають, наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Класифікація особливих умов бетонування

Група умов	Визначальні чинники	Основні ризики для бетону
Холодний період	Тп < +5 °С, вітер, тривалість похолодання	Сповільнення твердіння, раннє заморожування, недобір міцності
Жаркий період	Тп > 25…27 °С, φ < 50 %, вітер > 3 м/с, сонячна радіація	Втрата рухливості, пластична усадка, тріщини, зниження довговічності поверхні
Масивні конструкції	Мінімальний розмір ≥ 1 м, вміст і вид цементу, Тукл	Перегрів ядра понад 70 °С (DEF), температурні тріщини від перепаду ядро – поверхня

Важливо, що межі між групами не є постійними: одна й та сама плита перекриття в Кропивницькому в січні потребує регламенту холодного періоду, у липні – жаркого, а в травні може бути забетонована за звичайною технологією. Тому регламент має бути не «зимовим» чи «літнім» документом, а набором правил, вибір яких здійснюється за прогнозом погоди та характеристиками конструкції.

1.2 Процеси в бетоні за низьких температур

Швидкість гідратації портландцементу підпорядковується закону Арреніуса: зниження температури бетону з +20 до +5 °С зменшує швидкість реакцій приблизно вдвічі–втричі, а поблизу 0 °С гідратація практично зупиняється [8, 9]. Небезпеку становить не лише уповільнення набору міцності, а й заморожування вільної води, об'єм якої під час переходу в лід збільшується приблизно на 9 %. Якщо бетон замерзає до досягнення певної критичної міцності, тиск льоду руйнує зв'язки між продуктами гідратації і заповнювачами; після відтавання бетон продовжує тверднути, але його кінцева міцність, щільність і зчеплення з арматурою залишаються зниженими.

Керівництво ACI 306R вважає, що бетон, який досяг міцності на стиск приблизно 3,5 МПа, здатний без пошкоджень витримати один цикл заморожування в насиченому стані, і рекомендує захищати конструкцію щонайменше до досягнення цієї міцності, а для конструкцій, що в процесі експлуатації зазнають попеременного заморожування, – до більших значень [2].

У польській практиці безпечну (критичну) міцність приймають у межах 3,5…8 МПа і не менше 20 % проєктної 28-добової міцності [10]; галузеві посібники, що спираються на ACI 306R, називають орієнтир 5 МПа і зазначають, що заморожування в перші години після укладання може знизити кінцеву міцність майже вдвічі [11]. Для конструкцій, які після розпалублення сприймають навантаження і насичуються водою, у регламентах доцільно вимагати не менше 50 % fck [1].

Методи зимового бетонування поділяються на дві групи [5, 11]:

– безпрогрівні – метод «термоса» з використанням тепла підігрітої суміші та екзотермії цементу, бетони з протиморозними добавками, бетони на швидкотверднучих цементах;

– методи з підведенням тепла – електродний прогрів, прогрів нагрівальними проводами, термоактивна опалубка, інфрачервоний та індукційний прогрів, тепляки з тепловими гарматами.

Вибір методу залежить від модуля поверхні конструкції Мп (відношення площі охолоджуваних поверхонь до об'єму), температури повітря та вітру. Метод «термоса» є найбільш економічним, але обмежений масивними й середньомасивними конструкціями; для тонких плит і стін його можливості розширюють підігрівом суміші, утепленою опалубкою та добавками-прискорювачами.

Цікавим прикладом сучасного підходу є технологія «Heating Off Technology», досліджена в ДП НДІБК [12]. Її суть полягає у відмові від штучного прогріву конструкції: бетонну суміш з добавками, що регулюють тепловиділення, доставляють із підвищеною температурою, а конструкцію утеплюють так, щоб власного тепла гідратації вистачило для набору критичної міцності. Автори показали, що за правильно підібраного складу та утеплення можна відмовитися від енергоємного електропрогріву, контролюючи температуру бетону датчиками. Цей підхід за змістом відповідає моделі «зрілість + тепловиділення», яку використано в розділі 3 цієї роботи.

Ще одним важливим наслідком холодного періоду є розтягнення тривалості догляду. Класи догляду ДСТУ EN 13670 визначено через частку міцності, тому за низьких температур необхідна тривалість догляду зростає в кілька разів – від 1,5…3,5 доби за +25 °C до 3,5…18 діб за +5…10 °C для класу 3 [13].

1.3 Процеси в бетоні за високих температур і низької вологості

Жаркою погодою для бетонних робіт керівництво ACI 305R вважає будь-яке поєднання високої температури повітря, високої температури бетону, низької відносної вологості, швидкості вітру та сонячної радіації, яке погіршує якість свіжого або затверділого бетону [3]. Головна відмінність від зимового бетонування полягає в тому, що небезпеку визначає не одна температура, а сукупність чинників, тому найзручнішим інтегральним показником є інтенсивність випаровування води з поверхні E, кг/(м²·год).

Підвищення температури суміші прискорює тужавлення і зменшує час, протягом якого суміш можна транспортувати, укладати й ущільнювати. Для збереження рухливості на будівельному майданчику нерідко додають воду, що збільшує водоцементне відношення і знижує міцність і довговічність. Крім того, бетон, що твердне за підвищеної температури, швидко набирає ранню міцність, але має грубішу пористу структуру і нижчу 28-добову міцність порівняно з бетоном нормального твердіння [3].

Найбільш помітний дефект бетонування в жарку погоду – пластичні усадкові тріщини. Вони утворюються, коли інтенсивність випаровування перевищує швидкість підйому води на поверхню (водовідділення). Поверхня висихає, у капілярах між частинками виникає від'ємний тиск, і поверхневий шар, ще не маючи міцності на розтяг, розтріскується. Тріщини мають довжину від кількох сантиметрів до метра, часто проходять на всю висоту захисного шару і відкривають доступ агресивним речовинам до арматури [14].

Для оцінювання ризику пластичної усадки використовують номограму ACI 305, побудовану за рівнянням Мензеля, або її аналітичну апроксимацію,

запропоновану П. Уно [14]. Загальноприйнято, що за E > 1,0 кг/(м²·год) заходи захисту поверхні обов'язкові, а для бетонів з низьким водовідділенням (високоміцні бетони, бетони з мікрокремнеземом, низьке В/Ц) їх потрібно вживати вже за E > 0,5 кг/(м²·год) [3, 14].

Окремо слід зазначити вплив сонячної радіації: темна поверхня опалубки та арматури нагрівається на 15–25 K вище за температуру повітря, що підвищує температуру суміші під час укладання. Тому в регламентах жаркого періоду рекомендують бетонування у вечірні та нічні години, зволоження і затінення опалубки та заповнювачів [6].

У роботі Кіракевича І. І., Саницького М. А. та Чайковської Р. В. [6] показано, що застосування суперпластифікованих самоущільнювальних систем з активними мінеральними добавками дає змогу керувати кінетикою структуроутворення як у зимових, так і в сухих спекотних умовах, скоротити тривалість догляду та підвищити оборотність опалубки. Це свідчить, що регламент повинен охоплювати не лише заходи на майданчику, а й вимоги до складу бетону.

1.4 Масивні конструкції: термонапружений стан і DEF

Масивною вважають конструкцію, у якій тепловиділення цементу та повільне відведення тепла можуть спричинити шкідливі температурні напруження або зміну структури бетону. Практично до масивних відносять елементи з мінімальним розміром від 0,9…1,0 м [4, 15]. За таких розмірів температура в ядрі наближається до адіабатичної і для бетону з 350…400 кг/м³ портландцементу може зрости на 50…70 K порівняно з температурою укладання [15].

З цим пов'язано два ризики. Перший – температурні тріщини. Поверхня охолоджується швидше за ядро, тому в зовнішньому шарі виникають розтягувальні напруження, пропорційні перепаду температур ядро – поверхня. ACI 301 обмежує цей перепад значенням 19 °C (35 °F), якщо проєктом не обґрунтовано іншу величину [4, 15]. Другий ризик – відкладене утворення

етрингіту (DEF, delayed ettringite formation). Якщо в ранньому віці температура бетону перевищує приблизно 65…70 °С, первинний етрингіт розкладається, а сульфати адсорбуються гідросилікатами; через місяці й роки у вологих умовах етрингіт утворюється знову, спричиняючи розширення і сітку тріщин. Тому більшість специфікацій обмежує максимальну температуру бетону значенням 70 °С [16, 4].

Для обох обмежень стандартною практикою є розроблення плану температурного контролю (thermal control plan), який містить прогноз максимальної температури і перепаду, вимоги до температури укладання, складу бетону, утеплення і схеми розміщення датчиків [15, 16]. Основними засобами зменшення максимальної температури є зниження вмісту клінкеру (цементи CEM II, CEM III, золи-винесення), охолодження суміші та бетонування ярусами; засобом зменшення перепаду – утеплення поверхні, яке, навпаки, дещо підвищує температуру ядра.

1.5 Нормативна база України та Європейського Союзу

Нормативне регулювання бетонних робіт в Україні сьогодні базується на трьох рівнях документів. Проєктування бетонних і залізобетонних конструкцій регламентує ДБН В.2.6-98:2009 зі зміною № 1 [17], у якому враховано положення Єврокоду 2. Вимоги до бетонних сумішей і бетону встановлює ДСТУ Б В.2.7-176:2008, розроблений з урахуванням EN 206-1 [18], а на європейському рівні – EN 206:2013+A2:2021 [19]. Виконання робіт регламентує ДСТУ EN 13670:2023, ідентичний EN 13670:2009, який набрав чинності 1 жовтня 2023 року [1].

ДСТУ EN 13670 не містить окремих розділів «зимове» чи «літнє» бетонування. Натомість він вимагає, щоб у специфікації виконання було передбачено заходи, які забезпечують потрібні властивості бетону за фактичних погодних умов, та встановлює загальні вимоги до температури, догляду і захисту. Найважливішим інструментом стандарту є класи догляду (табл. 1.2), що визначають, до якої частки характеристичної міцності поверхневий шар бетону має бути захищений від висихання [1, 13].

Таблиця 1.2

Класи догляду за бетоном за ДСТУ EN 13670 [13]

Клас догляду	**Критерій закінчення догляду**	**Тривалість за +25 °C, діб**	**Тривалість за +5…10 °C, діб**
1	12 год	0,5	–
2	35 % fck поверхні	1…2,5	2…11
3	50 % fck поверхні	1,5…3,5	3,5…18
4	70 % fck поверхні	3…6	9…30

Як видно з табл. 1.2, тривалість догляду за одним класом відрізняється в 5–10 разів залежно від температури і швидкості набору міцності бетону. Стандарт залишає визначення конкретних значень виконавцю, допускаючи розрахунок на основі даних про розвиток міцності бетону, тобто фактично – за методом зрілості.

EN 206 вимагає зазначати клас швидкості набору міцності ($r = f_{cm2}/f_{cm28}$: швидкий ≥ 0,5; середній ≥ 0,3; повільний ≥ 0,15; дуже повільний < 0,15) та обмежує мінімальну температуру суміші під час постачання значенням +5 °C [19]. ДСТУ Б В.2.7-176 встановлює вимоги до складу бетону для класів експлуатації, які разом із класом догляду визначають довговічність захисного шару [18].

Національні кліматичні дані, необхідні для вибору регламенту, наведено в ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 «Будівельна кліматологія» [20]: середньомісячні температури, вологість, повторюваність і швидкість вітру. Саме ці дані використано в розділі 2 для обґрунтування періодів дії регламентів.

Значну увагу питанням технології бетонних робіт приділено в українській навчальній і науковій літературі. У монографії Якименка О. В., Кондращенка О. В. і Атиняна А. О. [5] систематизовано технологічні процеси бетонування, методи зимового бетонування і догляду, розрахунок «термоса» та прогріву. Практичні посібники для підрядників [11] узагальнюють прийоми підігріву компонентів, утеплення і контролю температури, що застосовуються і на українських будівельних майданчиках.

1.6 Американські керівництва ACI

Найбільш детально бетонування в особливих умовах описано в документах Американського інституту бетону. ACI 305R-20 [3] містить методику оцінювання жаркої погоди, номограму випаровування, формули для розрахунку температури суміші, в тому числі з частковою заміною води льодом, і перелік заходів – від охолодження заповнювачів до нічного бетонування. Особливість документа – відмова від єдиної граничної температури суміші: керівництво рекомендує встановлювати її для кожного проєкту на підставі досвіду і пробних замісів, вказуючи на типові значення 32…35 °C.

ACI 306R-16 [2] визначає холодну погоду як період, коли температура повітря опустилася або очікується нижче 4 °C протягом періоду захисту. Документ наводить рекомендовані мінімальні температури бетону залежно від найменшого розміру перерізу, тривалість захисту, вимоги до утеплення та тепляків, а також застерігає від різкого охолодження після зняття захисту.

ACI 301-20 [4] у розділі про масивний бетон встановлює граничну максимальну температуру 70 °C і перепад 19 °C та вимагає розроблення плану температурного контролю. Звіт комітету ACI 207 [15] містить методики розрахунку адіабатичного підвищення температури і тепловідведення, а практичні аспекти дотримання цих меж розглянуто в публікації Дж. Гайди і М. ВанГім [16] (див. підрозд. 1.8).

Порівняння підходів показує, що ACI надає розрахункові інструменти, а ДСТУ EN 13670 – рамку вимог. Їх поєднання дає змогу будувати регламент так: рамкові вимоги та класи – за ДСТУ EN 13670 та EN 206, розрахункові методи та граничні значення, яких немає в європейських документах, – за ACI з посиланням на джерело.

1.7 Інструментальний контроль: метод зрілості

Метод зрілості дає змогу оцінювати міцність бетону в конструкції за історією його температури. Він ґрунтується на гіпотезі, що бетон одного складу за однакової зрілості має однакову міцність незалежно від того, за якої

температури цю зрілість набрано. ASTM C1074 [8] передбачає дві функції зрілості: температурно-часовий фактор Нурса–Саула з базовою температурою T_0 і еквівалентний вік за функцією Арреніуса, запропонованою Фрайслебеном Гансеном і Педерсеном [9].

Для застосування методу виконують калібрування: на зразках конкретного складу визначають залежність міцності від зрілості, а в конструкції встановлюють датчики температури з реєстраторами. Сучасні бездротові датчики передають дані в мобільні застосунки і в реальному часі показують оцінку міцності [8]. Це дає змогу обґрунтовано визначати момент розпалублення, припинення прогріву чи догляду і навантаження конструкції, а для масивних елементів – одночасно контролювати максимальну температуру і перепад.

Обмеження методу відомі: він не враховує зміну складу, недостатній вологісний догляд і вплив дуже високої ранньої температури на кінцеву міцність, тому результати періодично перевіряють випробуванням зразків або неруйнівними методами [8]. Для регламентування це означає, що метод зрілості доцільно використовувати як основний засіб керування тривалістю догляду, а не як заміну контролю міцності.

1.8 Огляд експериментальних і натурних досліджень

Нормативні документи встановлюють межі, але не показують, як поводиться бетон у реальних конструкціях. Тому окремо проаналізовано публікації, у яких наведено результати вимірювань на будівельних об'єктах і чисельного моделювання, – як для холодного періоду, так і для масивних конструкцій у жаркому кліматі.

Бетонування за низьких температур. Посібник компанії CANZAC [11], підготовлений на основі ACI 306R-16, визначає умови заморожування як період, коли температура повітря під час захисту опускається або очікується нижче 5 °C. У ньому наведено рекомендовані температури суміші залежно від мінімального розміру перерізу (для перерізів до 300 мм за температури повітря від −18 до +1

°C – від 18 до 27 °C), формули втрат температури під час доставки (для автобетонозмішувача $\Delta T = 0{,}25 \cdot (tr - ta)$ за 1 год) і вимогу EN 13670 не допускати охолодження поверхні нижче 0 °C до досягнення міцності 5 МПа. Типові умови такого бетонування показано на рис. 1.1.



Рис. 1.1 Бетонування фундаментної плити в умовах снігопаду та морозу [11]

Практичні наслідки порушення регламенту зимового бетонування докладно описано К. Овчарською, Е. Шмігерою та П. Вояховським [10] на прикладі монолітного перекриття багатоквартирного будинку в Польщі. Бетонування плити класу C30/37 тривало близько 14 год за температури повітря від −9 до −12,9 °C з перервами в постачанні суміші та під снігопадом; суміш надходила з температурою 9…12 °C. Після завершення робіт з'ясувалося, що значна частина нагрівачів системи електропрогріву перегоріла, і бетон залишився без захисту, а температура повітря на сьому добу знизилася до −18,7 °C. Обстеження кернів (рис. 1.2) виявило заморожений верхній шар товщиною 1,5…2 см з мікротріщинами; нижня поверхня, опалубку під якою заздалегідь прогрівали близько 4 год, не постраждала. Середня міцність кернів у віці 16 діб становила 28,5 МПа у верхній частині і 27,1 МПа в нижній, що відповідало класу C20/25 замість проєктного C30/37.

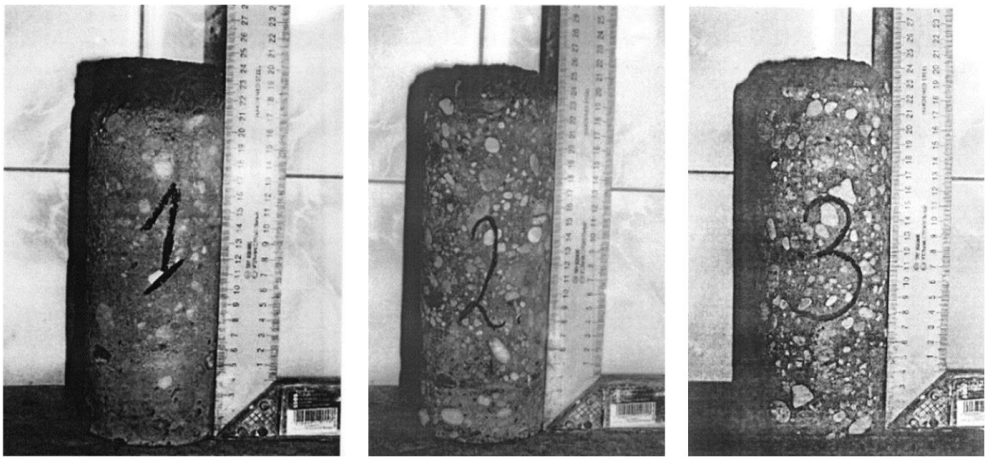


Рис. 1.2 Керни, відібрані з перекриття, що зазнало раннього заморожування [10]

Автори доходять висновку, що аварія стала наслідком збігу кількох несприятливих чинників – тривалого бетонування без укриття, відсутності контролю працездатності системи прогріву та відсутності вимірювання температури бетону, – кожен з яких окремо не був би критичним. Цей приклад безпосередньо обґрунтовує вимоги регламенту X щодо перевірки системи прогріву до початку бетонування, укриття поверхні одразу після загладжування і безперервної реєстрації температури.

Тепловиділення і масивні конструкції. Звіт ACI 207.1R-96 [15] є базовим документом щодо масивного бетону. У ньому показано, що адіабатичне підвищення температури суттєво залежить від типу цементу (рис. 1.3): за вмісту цементу 223 кг/м³ бетон на швидкотверднучому цементі (тип III) нагрівається приблизно на 30 K уже за кілька діб, тоді як на низькотермічному цементі (тип IV) підвищення температури розтягнуто в часі і є значно меншим. Звіт також наводить методики розрахунку тепловідведення для плит, циліндрів і стін і визначення параметрів трубчастого охолодження.

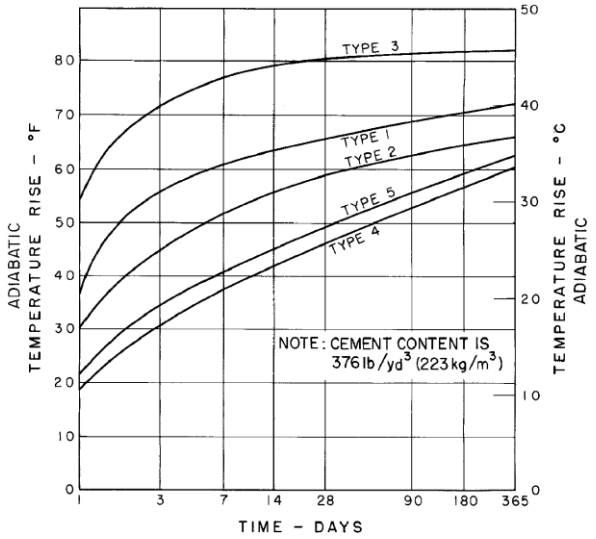


Рис. 1.3 Адіабатичне підвищення температури бетону на цементах різних типів [15]

Дж. Гайда і М. ВанГім [16] звертають увагу, що типові вимоги специфікацій – не більше 135 °F (57 °C) для максимальної температури і 35 °F (19 °C) для перепаду – нерідко призначаються без урахування властивостей конкретного бетону. За їхніми даними, кожні 100 фунтів цементу на кубічний ярд (≈ 59 кг/м³) підвищують температуру масивного бетону приблизно на 12,8 °F (7,1 K), тобто ≈ 1,2 K на кожні 10 кг/м³ цементу. Серед методів контролю розглянуто низькотермічні цементи та мінеральні добавки, попереднє охолодження суміші, поверхневе утеплення і внутрішнє охолодження трубами, ефект якого показано на рис. 1.4: максимальна середня температура знижується приблизно з 134 до 116 °F (з 57 до 47 °C), а охолодження прискорюється.

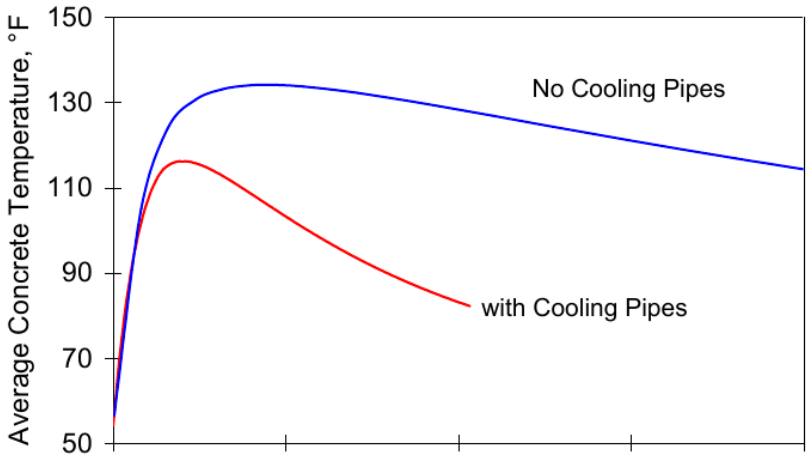


Рис. 1.4 Вплив внутрішніх охолоджувальних труб на середню температуру масивного бетону [16]

К. Янкович, З. Ромаков, Д. Боєвич і Д. Ніколич [21] дослідили масивні бетонні блоки (куби об'ємом 6,3…12,7 м³ і акроподи), виготовлені для реконструкції хвилеламу в порту Тріполі (Лівія), тобто в жаркому кліматі (рис. 1.5). Причиною тріщин на блоках став перепад температур між ядром і поверхнею, тому виготовлено блоки з вмістом цементу 300, 320 і 350 кг/м³ і виміряно температуру в ядрі, на бічній грані та на верхньому ребрі.



Рис. 1.5 Масивні бетонні блоки об'ємом 12,7 м³ для хвилеламу [21]

За табличними даними авторів побудовано графік зміни температури (рис. 1.6). Максимальна температура ядра (46 °C) досягається через 30…34 год, а найбільший перепад ядро – верхнє ребро становить 18 K у віці 44 год, тобто наближається до допустимих 20 K. Зменшення вмісту цементу на кожні 10 кг/м³ знижувало максимальне підвищення температури приблизно на 1,2 K, а блоки з 300 кг/м³ цементу тріщин не мали. На блоках з 320 і 350 кг/м³ тріщини мали глибину 2…3 см і ширину близько 0,2 мм. Важливо, що вимірювання температури в трубках, заповнених водою, дали результати, які відрізнялися від показів термопар у середньому лише на 0,4 °C, тому цей простий спосіб можна рекомендувати для будівельних майданчиків.

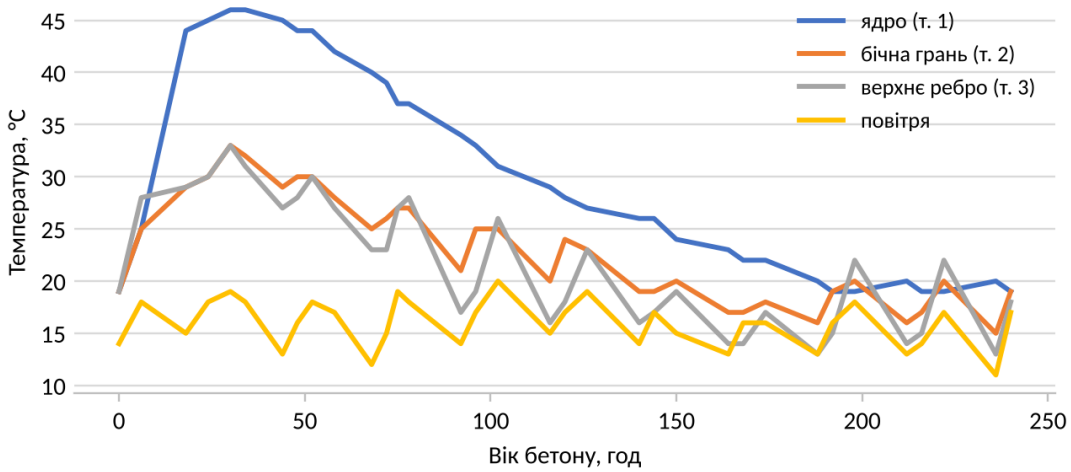


Рис. 1.6 Температура в характерних точках бетонного куба (побудовано автором за даними [21])

К. Бойке, М. Ірмаван, А. Навір і А. Бамбанг [22] описують контроль температури фундаментної плити висотного будинку в Сурабаї (Індонезія) товщиною 1,5…2,0 м. Для обмеження максимальної температури 70 °C і перепаду 20 °C застосовано склад із 30 % золи-винесення (250 кг цементу і 75 кг золи на 1 м³) та охолодженою льодом водою (7 °C), що дало розрахункову початкову температуру суміші 30 °C і прогнозовану максимальну 65,7 °C. Поверхню вкривали шаром пінополістиролу, поліетиленовою плівкою і вологим піском (рис. 1.7), а бетонування вели під тентами. Температуру контролювали 18 термопарами на трьох рівнях у шести точках (рис. 1.8). Виміряна максимальна температура становила 68 °C (через ≈ 60 год), а найбільший перепад – 13 °C, тобто обидві вимоги виконано.



Рис. 1.7 Поверхневе утеплення масивного фундаменту (шари зверху вниз: вологий пісок, пінополістирол, поліетиленова плівка, бетон) та його виконання на об'єкті [22]

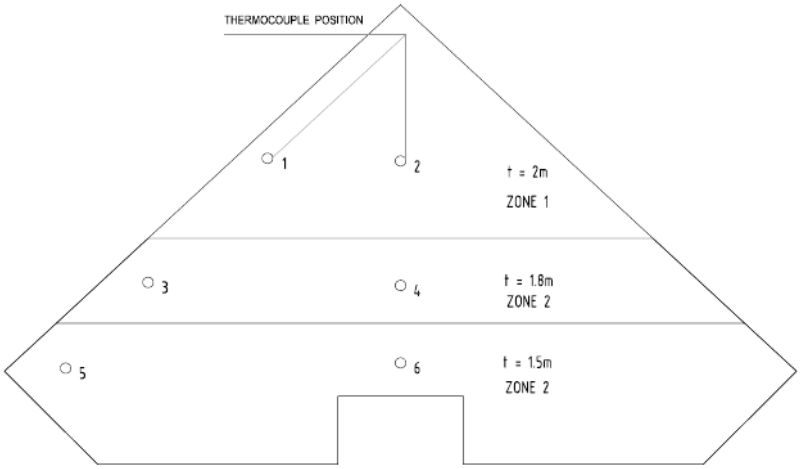


Рис. 1.8 Схема розміщення термопар у фундаментній плиті [22]

Т. Прасантан, С. Асамото і С. Нанаяккара [23] проаналізували поширену практику випробування масивного бетону на зменшених макетах (рис. 1.9): три вертикальні грані макета утеплюють пінополістиролом, щоб відтворити майже адіабатичні умови ядра. Чисельне моделювання показало, що максимальна температура в ядрі мало залежить від теплопровідності й теплоємності бетону, а перепад ядро – поверхня – суттєво, і що макет без належного утеплення недооцінює реальні температури. Отже, результати макетних випробувань слід переносити на конструкцію лише за відповідності умов тепловідведення.

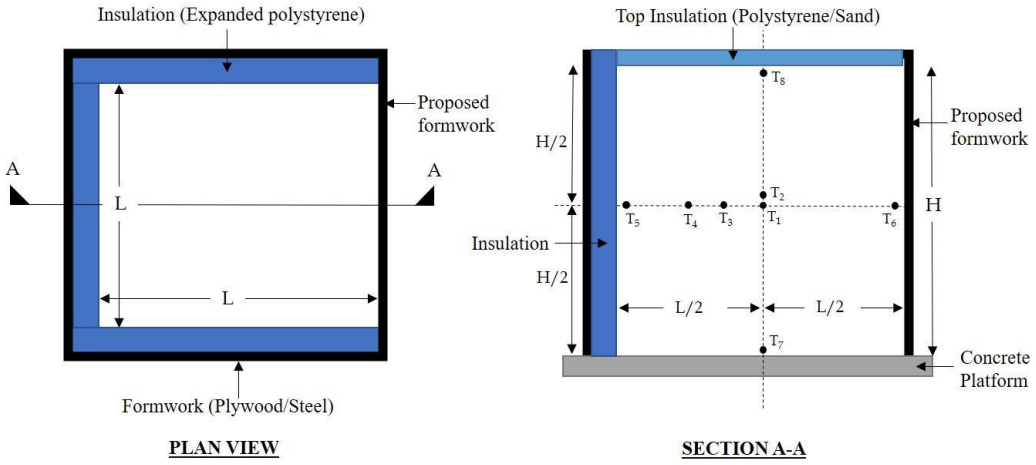
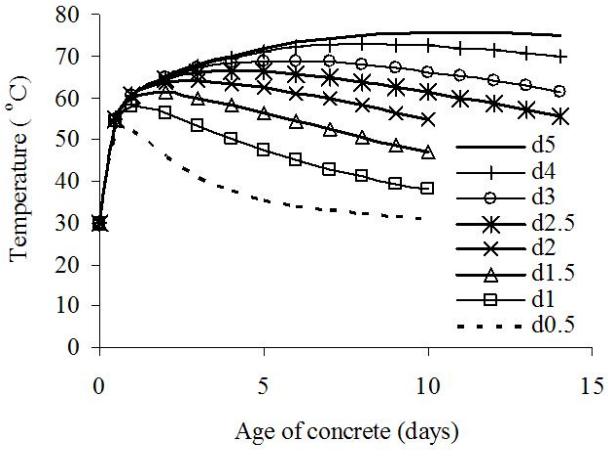


Рис. 1.9 Типове виконання макета масивного елемента з утепленням граней [23]

П. Чоктавікарн і С. Тангтермсірікул [24] виконали тривимірний скінченно-елементний аналіз масивних плит у кліматі Бангкока (середньорічна температура 28,7 °C, температура укладання 30 °C). Отримано, що максимальна температура зростає зі збільшенням товщини, але темп зростання зменшується, оскільки ядро

товстої плити працює майже адіабатично (рис. 1.10); за товщини понад 3 м обмежені деформації перевищують деформативність бетону на розтяг. Найефективнішим способом зниження ризику тріщин виявилося бетонування шарами, а безперервне утеплення поверхні є кращим за звичайний догляд; заповнювачі з низьким коефіцієнтом температурного розширення (вапняк) зменшують ризик тріщин порівняно з кварцитом.



(а)

Рис. 1.10 Температура в центрі масивної плити різної товщини [24]

Узагальнення результатів наведено в табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Узагальнення експериментальних і натурних досліджень

Джерело	Об'єкт, умови	Основні результати
Owczarska et al. [10]	Перекриття, Польща, −9…−18,7 °C	Відмова електропрогріву; заморожений шар 1,5…2 см; C20/25 замість C30/37
CANZAC [11]	Посібник за ACI 306R	Критична міцність 5 МПа; температури суміші за розміром перерізу; втрати під час доставки
ACI 207.1R [15]	Масивний бетон	Вплив типу цементу на адіабатичне підвищення температури; методи тепловідведення
Gajda, VanGeem [16]	Масивний бетон, США	≈ 1,2 K на 10 кг/м³ цементу; охолодження трубами −10 K
Janković et al. [21]	Блоки 6,3…12,7 м³, Лівія	Tmax 46 °C; ΔT до 18…19 K; 300 кг/м³ – без тріщин
Boyke et al. [22]	Фундамент 1,5…2 м, Індонезія	Зола 30 %, лід; Tmax 68 °C, ΔT 13 °C
Prasanthan et al. [23]	Макети, тропіки	Утеплення граней макета визначає достовірність прогнозу ΔT

Продовження таблиці 1.3

Джерело	Об'єкт, умови	Основні результати
Choktaweekarn et al. [24]	МСЕ, плити 0,5…10 м, Таїланд	Tmax зростає з товщиною; бетонування шарами, утеплення

Важливим висновком огляду є збіг кількісних оцінок, отриманих незалежно в різних кліматичних умовах: вплив вмісту цементу на максимальну температуру становить приблизно 1,2 K на 10 кг/м³ і за даними натурних вимірювань у Лівії [21], і за інженерною методикою [16], а допустимі значення 70 °C і 19…20 K однаково застосовуються в Індонезії [22], Лівії та США [4]. Це дає підстави використовувати ці значення в регламентах для умов України.

Висновки до розділу 1

1. Специфічні кліматичні умови бетонування поділяються на холодний період, жаркий період і внутрішні умови масивних конструкцій; для кожної групи визначальними є різні чинники, а для жаркого періоду – інтегральний показник інтенсивності випаровування.

2. Чинний в Україні ДСТУ EN 13670:2023 не містить готових «зимових» і «літніх» правил, а вимагає обґрунтувати заходи в специфікації виконання; ключовим інструментом є класи догляду, тривалість яких сильно залежить від температури.

3. Розрахункові інструменти (випаровування, температура суміші, план температурного контролю, граничні 70 °C і 19 °C) наведено в керівництвах ACI; їх доцільно поєднувати з рамковими вимогами європейських стандартів.

4. Метод зрілості за ASTM C1074 є основою для керування тривалістю догляду і моментом розпалублення в усіх кліматичних умовах.

5. Огляд натурних досліджень показав, що раннє заморожування перекриття через відмову системи прогріву знизило міцність бетону на один клас, а в масивних конструкціях різних кліматичних зон вплив вмісту цементу на максимальну температуру становить ≈ 1,2 K на 10 кг/м³; межі 70 °C і 19…20 K підтверджено практикою.

Тому в роботі поставлено завдання: сформувати розрахункові сценарії та критерії для району будівництва; кількісно оцінити ризики пластичної усадки, недобору міцності, раннього заморожування і перегріву масивного бетону; на цій основі розробити регламенти Х, Ж і М та алгоритм їх вибору.

Розділ 2

МЕТОДИКА ОБҐРУНТУВАННЯ РЕГЛАМЕНТІВ БЕТОНУВАННЯ

2.1 Кліматичні умови району будівництва

Як базовий район будівництва прийнято м. Кропивницький, де розташована база практики (ТОВ «Діалогбуд»). Середньомісячні температури повітря за ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 для метеостанції Кропивницький (Кіровоград) наведено в табл. 2.1 та на рис. 2.1 [20].

Таблиця 2.1

Середньомісячна температура повітря, °С, м. Кропивницький [20]

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Рік
−4,9	−3,9	0,8	9,1	15,2	18,6	20,4	19,7	14,7	8,2	2,1	−2,6	8,1

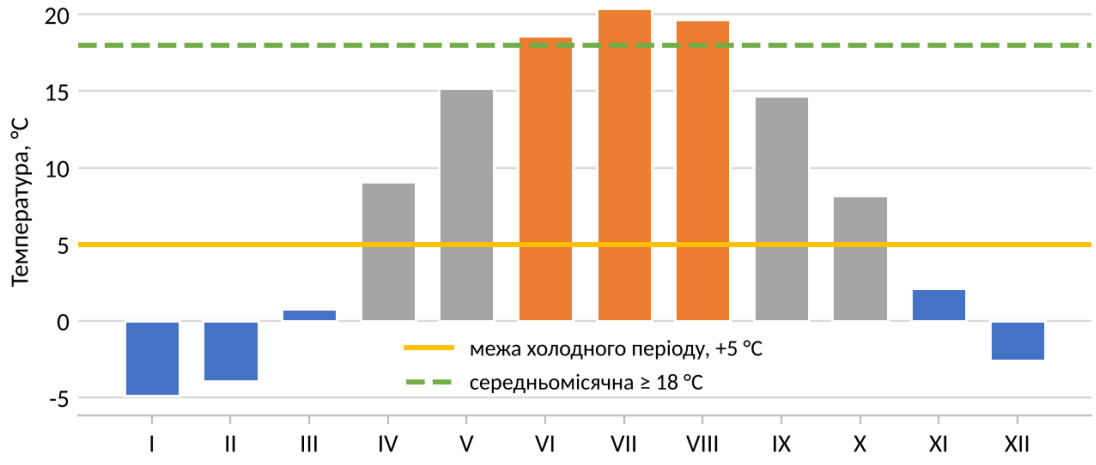


Рис. 2.1 Середньомісячна температура повітря в м. Кропивницькому та межі періодів (побудовано автором за даними [20])

Як видно з рис. 2.1, середньомісячна температура нижче +5 °С спостерігається протягом п'яти місяців (листопад – березень), а в січні та лютому вона від'ємна. Квітень і жовтень із середніми 9,1 і 8,2 °С є перехідними: удень бетонування можливе за звичайним регламентом, але нічні заморозки вимагають утеплення відкритих поверхонь. Три літні місяці мають середню температуру

18,6…20,4 °C; денна температура в ці місяці на 6…8 K вища за середньодобову, тобто регулярно досягає 27…30 °C, а в окремі дні 35 °C і більше.

Отже, для одного району необхідно щонайменше три регламенти: холодного періоду (листопад – березень і нічні заморозки в перехідні місяці), жаркого періоду (червень – серпень, а також дні з високою температурою в травні та вересні) і звичайний, а для масивних конструкцій – окремий регламент незалежно від сезону.

2.2 Розрахункові сценарії кліматичних умов

Щоб результати можна було перенести на інші кліматичні зони, крім умов Кропивницького розглянуто чотири розрахункові сценарії (табл. 2.2). Їх параметри прийнято як характерні методичні значення: жаркий сухий сценарій відповідає південним степовим районам України влітку, жаркий вологий – приморським районам і тропічному клімату, помірний – типовому літньому дню без особливих умов, сценарій «Кропивницький, липень» – денним годинам середнього липневого дня.

Таблиця 2.2

Розрахункові сценарії кліматичних умов (методичне припущення автора)

Сценарій	Тп, °C	φ, %	v, м/с	Тб, °C	E, кг/(м²·год)
Жаркий сухий	35	25	5,0	37	1,91
Жаркий вологий	32	80	2,5	34	0,35
Помірний	20	60	2,5	22	0,31
Кропивницький, липень (день)	27	45	3,6	28	0,70
Холодний	−10	85	5,0	+15 (укладання)	–

Значення E в останньому стовпці обчислено автором за формулою (2.1) (підрозд. 2.4). Уже на цьому етапі видно, що жаркий вологий клімат, попри вищу температуру, менш небезпечний з погляду пластичної усадки, ніж помірний сухий день із вітром: визначальним є дефіцит вологості, а не сама температура. Для умов Кропивницького середній липневий день дає $E \approx 0{,}70$ кг/(м²·год), тобто в зоні, де захисні заходи вже потрібні для бетонів з низьким водовідділенням.

2.3 Критерії переходу до спеціальних регламентів

На підставі аналізу розділу 1 сформовано критерії, за якими виконавець переходить від звичайного регламенту до спеціального (табл. 2.3). Критерії поєднують кліматичні показники (прогноз на період захисту) і характеристики конструкції.

Таблиця 2.3

Критерії вибору регламенту бетонування

Регламент	Умова застосування	Джерело критерію
Х – холодний період	Середньодобова Тп < +5 °С або мінімальна Тп < 0 °С протягом періоду догляду	ACI 306R [2]; ДСТУ-Н Б В.1.1-27 [20]
Ж – жаркий період	Е > 0,5 кг/(м²·год) або Тп > 27 °С у години бетонування, або Тсуміші > 30 °С	ACI 305R [3]; [14]
М – масивні конструкції	Мінімальний розмір ≥ 1,0 м або прогноз Tmax > 60 °С	ACI 301 [4]; [16]
Звичайний	Жодна з умов не виконується	ДСТУ EN 13670 [1]

Граничні значення, які мають забезпечувати регламенти, зведено в табл. 2.4. Вони прийняті за чинними стандартами та керівництвами, а там, де документи дають діапазон, обрано консервативне значення.

Таблиця 2.4

Граничні значення параметрів, прийняті для регламентів

Параметр	Значення	Обґрунтування
Мінімальна температура суміші при постачанні	+5 °С	EN 206 [19]
Мінімальна температура суміші при укладанні в холодний період	+10…+15 °С	ACI 306R [2]
Максимальна температура суміші при укладанні	+30 °С	ACI 305R [3]
Критична міцність перед заморожуванням	≥ 3,5 МПа, для навантажених конструкцій ≥ 50 % fck	[2, 1]
Інтенсивність випаровування без захисту	≤ 0,5 кг/(м²·год)	[3, 14]
Максимальна температура бетону	≤ 70 °С	ACI 301, DEF [4, 16]
Перепад температур ядро – поверхня	≤ 19…20 °С	ACI 301 [4]
Мінімальний клас догляду	2 (звичайні), 3 (XC3, XC4, XF)	ДСТУ EN 13670 [1]

2.4 Розрахункові моделі

Інтенсивність випаровування. Для оцінювання E використано аналітичну апроксимацію номограми ACI 305, запропоновану П. Уно [14]:

$$E = 5\cdot[(Тб + 18)^{2,5} - \varphi\cdot(Тп + 18)^{2,5}]\cdot(V + 4)\cdot10^{-6} \qquad (2.1)$$

де E – інтенсивність випаровування, кг/(м²·год); Тб, Тп – температура поверхні бетону і повітря, °C; φ – відносна вологість повітря, частки одиниці; V – швидкість вітру на висоті 0,5 м над поверхнею, км/год.

Температура бетонної суміші. Температуру суміші визначено з рівняння теплового балансу компонентів з урахуванням вологи заповнювачів та можливої заміни частини води льодом:

$$T = [c_s\cdot(m_ц T_ц + m_з T_з) + c_в\cdot w_з T_з + c_в\cdot m_в T_в - L\cdot m_л] / [c_s\cdot(m_ц + m_з) + c_в\cdot m_{в,заг}] \qquad (2.2)$$

де c_s = 0,92 кДж/(кг·К) – питома теплоємність цементу і заповнювачів; $c_в$ = 4,19 кДж/(кг·К) – теплоємність води; $m_ц$, $m_з$, $m_в$, $m_л$ – маси цементу, заповнювачів, води замішування і льоду, кг/м³; $w_з$ – вода, що міститься в заповнювачах; L = 334 кДж/кг – теплота плавлення льоду; $T_ц$, $T_з$, $T_в$ – температури компонентів, °C. Формула за змістом збігається з наведеною в ACI 305R [3].

Зрілість і міцність. Еквівалентний вік за температури 20 °C обчислено за функцією Арреніуса [8, 9]:

$$t_e = \Sigma\ \exp[-(E_a/R)\cdot(1/(273 + T) - 1/293)]\cdot\Delta t \qquad (2.3)$$

де E_a = 40 кДж/моль – уявна енергія активації (типове значення для портландцементу без добавок); R = 8,314 Дж/(моль·К) – газова стала; T – середня температура бетону за інтервал Δt, °C.

Для порівняння використано також функцію Нурса–Саула з базовою температурою $T_0 = -10$ °C. Залежність міцності від еквівалентного віку прийнято гіперболічною:

$$f(t_e) = f_u \cdot k \cdot (t_e - t_0) / [1 + k \cdot (t_e - t_0)] \quad (2.4)$$

де $f_u = 38$ МПа – гранична міцність; $t_0 = 0{,}5$ доби – вік початку набору міцності; k – константа швидкості, визначена з умови f(28) = 33 МПа (середня міцність бетону класу С25/30), $k = 0{,}24$ доба$^{-1}$.

Тепловиділення цементу. Кумулятивне тепловиділення описано функцією Шиндлера – Фоліарда [25]:

$$Q(t_e) = H_u \cdot C \cdot \exp[-(\tau/t_e)^{\beta}] \quad (2.5)$$

де H_u – повна теплота гідратації цементу, кДж/кг; C – вміст цементу, кг/м³; τ, β – параметри часу і форми кривої (прийнято τ = 14…20 год, β = 1,05).

Тепловий режим конструкції. Для тонких плит (метод «термоса») використано зосереджену модель, у якій температура однакова по товщині, а втрати тепла визначаються коефіцієнтами теплопередачі верхнього утеплення і опалубки. Для масивних конструкцій розв'язано одновимірне рівняння теплопровідності з внутрішнім джерелом тепла:

$$\rho c \cdot \partial T/\partial t = \lambda \cdot \partial^2 T/\partial x^2 + \partial Q/\partial t \quad (2.6)$$

де ρ = 2400 кг/м³, c = 1,0 кДж/(кг·К), λ = 2,5 Вт/(м·К) – густина, теплоємність і теплопровідність бетону. Граничні умови – конвективний теплообмін з повітрям через шар утеплювача (коефіцієнт тепловіддачі 5,8 + 3,9v Вт/(м²·К)). Рівняння розв'язано явною скінченнорізницевою схемою на сітці з 41 вузла.

Статистичне моделювання. Оскільки температура, вологість і вітер змінюються випадково, ризик пластичної усадки для Кропивницького оцінено методом Монте-Карло (20 000 реалізацій). Методичні припущення: денна температура повітря в липні – нормальний розподіл із середнім 27 °С і стандартом 3,5 К; відносна вологість від'ємно корелює з температурою; швидкість вітру – розподіл Вейбулла з параметром форми 2 і середнім 3,5 м/с; температура поверхні бетону на 1…4 К перевищує температуру повітря. Для інших місяців середня денна температура прийнята як середньомісячна за [20] плюс 6,6 К.

Розрахунки виконано автором у середовищі Python (бібліотеки NumPy, Matplotlib).

Висновки до розділу 2

1. Для м. Кропивницького холодний період із середньою температурою нижче +5 °C триває п'ять місяців, а жаркий – три; квітень і жовтень є перехідними. Це обумовлює потребу щонайменше в трьох регламентах.

2. Сформовано п'ять розрахункових сценаріїв і критерії переходу до регламентів Х, Ж і М, а також таблицю граничних значень із посиланням на джерела.

3. Обрано розрахункові моделі: формулу Уно для випаровування, тепловий баланс для температури суміші, метод зрілості з гіперболічною функцією міцності, модель тепловиділення Шиндлера – Фоліарда, зосереджену та одновимірну теплові моделі і метод Монте-Карло.

Розділ 3

РОЗРАХУНКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕГЛАМЕНТІВ

3.1 Інтенсивність випаровування та ризик пластичної усадки

За формулою (2.1) розраховано залежність інтенсивності випаровування від швидкості вітру для чотирьох поєднань температури і вологості повітря (рис. 3.1). Температуру поверхні бетону прийнято на 2 K вищою за температуру повітря.

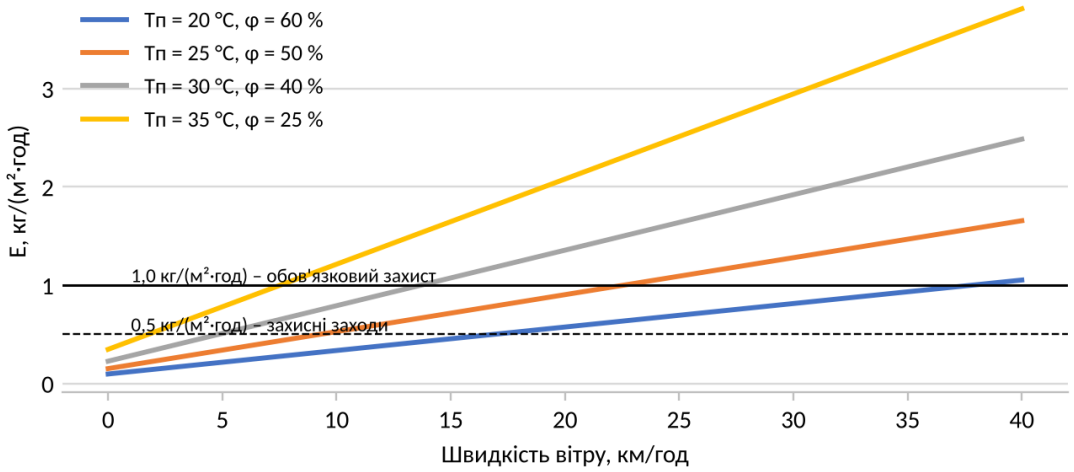


Рис. 3.1 Залежність інтенсивності випаровування від швидкості вітру (розрахунок автора за формулою Уно [14])

Результати показують, що за помірної погоди (20 °C, 60 %) поріг 0,5 кг/(м²·год) досягається лише за вітру понад 17 км/год (4,7 м/с), а поріг 1,0 – за вітру близько 38 км/год. Натомість у жаркий сухий день (35 °C, 25 %) інтенсивність випаровування перевищує 0,5 кг/(м²·год) уже за слабкого вітру близько 2 км/год, а 1,0 кг/(м²·год) – за вітру близько 7 км/год (2 м/с). Отже, у сухому кліматі захист поверхні необхідний практично завжди, тоді як у помірному – лише у вітряні дні.

Для оцінювання ризику в Кропивницькому виконано моделювання методом Монте-Карло для денних годин липня. Гістограму розподілу E наведено на рис. 3.2.

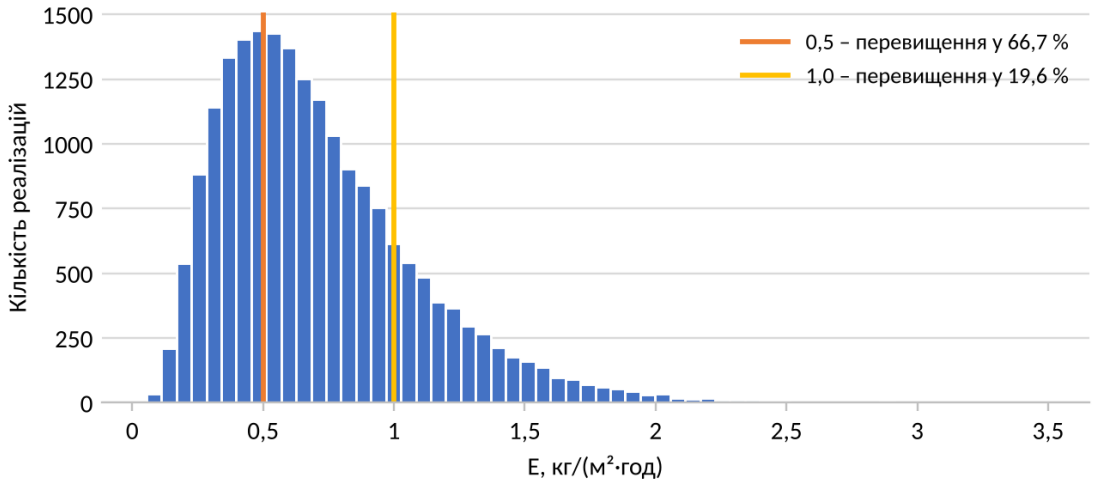


Рис. 3.2 Розподіл інтенсивності випаровування в денні години липня, м. Кропивницький (моделювання автора, 20 000 реалізацій)

Середнє значення E становить 0,71 кг/(м²·год), 95-й процентиль – 1,46 кг/(м²·год). Ймовірність перевищення порогу 0,5 кг/(м²·год) дорівнює 66,7 %, порогу 1,0 кг/(м²·год) – 19,6 %. Іншими словами, у двох із трьох липневих днів бетонування горизонтальних поверхонь потребує захисних заходів, а приблизно в кожен п'ятий день без захисту виникнення пластичних тріщин є майже неминучим.

Аналогічні розрахунки виконано для травня – вересня (рис. 3.3, табл. 3.1).

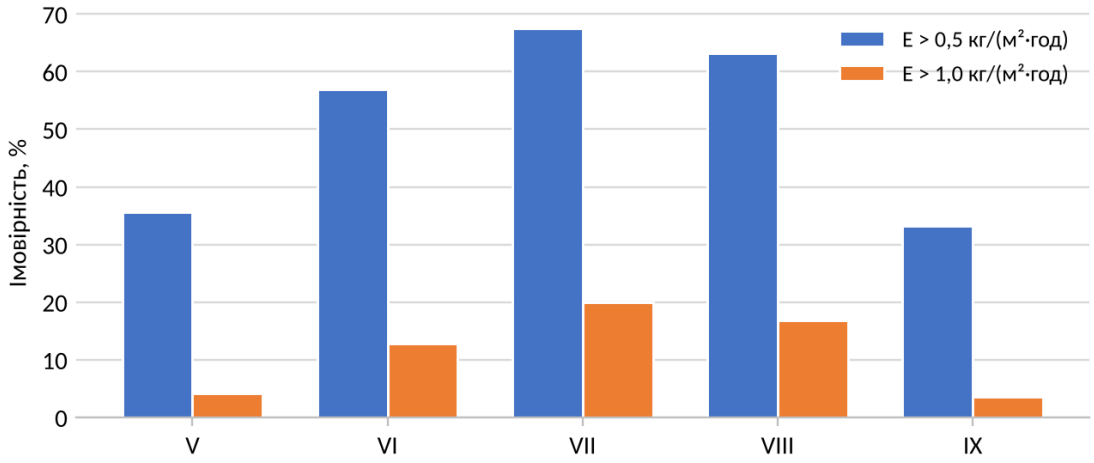


Рис. 3.3 Ймовірність перевищення критичної інтенсивності випаровування за місяцями (моделювання автора)

Таблиця 3.1

Ймовірність перевищення порогових значень E за місяцями теплого періоду, %

Показник	V	VI	VII	VIII	IX

E > 0,5 кг/(м²·год)	35,6	56,9	67,5	63,2	33,2
E > 1,0 кг/(м²·год)	4,1	12,8	19,9	16,8	3,6

З табл. 3.1 випливає, що в червні – серпні ймовірність перевищення порогу 0,5 становить понад 55 %, тобто захист поверхні слід передбачати в регламенті як обов'язковий захід за замовчуванням. У травні та вересні ймовірність становить близько третини, тож заходи доцільно призначати за фактичним прогнозом на день бетонування. Ймовірність перевищення 1,0 кг/(м²·год) у ці місяці не перевищує 4 %, тому жорсткі заходи (вітрозахисні екрани, туманоутворення) у травні та вересні не потрібні.

Отримані значення суттєво залежать від прийнятих статистичних припущень, тому їх слід розглядати як оцінку порядку величин. Однак загальний висновок – обов'язковість захисту від випаровування в літні місяці в центральних районах України – є стійким: навіть за середніх параметрів липневого дня E = 0,70 кг/(м²·год).

3.2 Температура бетонної суміші в жаркий період

Розрахунок температури суміші виконано для бетону класу С25/30 складу, кг/м³: цемент – 350, пісок – 700, щебінь – 1150, вода – 175. Вологість піску прийнято 4 %, щебеню – 1 %; вода, що міститься в заповнювачах, враховується у загальній кількості води замішування. Цемент у жарку погоду надходить із силоса з температурою близько 60 °С.

За температури заповнювачів 30 °С і води 25 °С формула (2.2) дає температуру суміші 32,5 °С, що перевищує прийняту межу +30 °С. Використання охолодженої води (8 °С) знижує температуру до 29,0 °С, а одночасне затінення і зволоження заповнювачів до 25 °С – до 25,6 °С.

Вплив окремих компонентів на температуру суміші наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Чутливість температури суміші до температури компонентів (розрахунок автора)

Захід	Зміна температури компонента	Зміна температури суміші, K
Охолодження заповнювачів	−5 K	−3,39
Охолодження води	−10 K	−2,06
Охолодження цементу	−10 K	−1,17

Найефективнішим заходом є охолодження заповнювачів, оскільки вони становлять близько 80 % маси суміші: зниження їх температури на 1 K зменшує температуру суміші приблизно на 0,7 K. Охолодження води ефективніше на одиницю маси завдяки великій теплоємності, але маса води мала. Охолодження цементу найменш ефективне, проте вимога не застосовувати «гарячий» цемент безпосередньо з помелу залишається доцільною.

Найпотужнішим засобом є заміна частини води льодом, оскільки на плавлення 1 кг льоду витрачається 334 кДж. Розраховані залежності наведено на рис. 3.4.

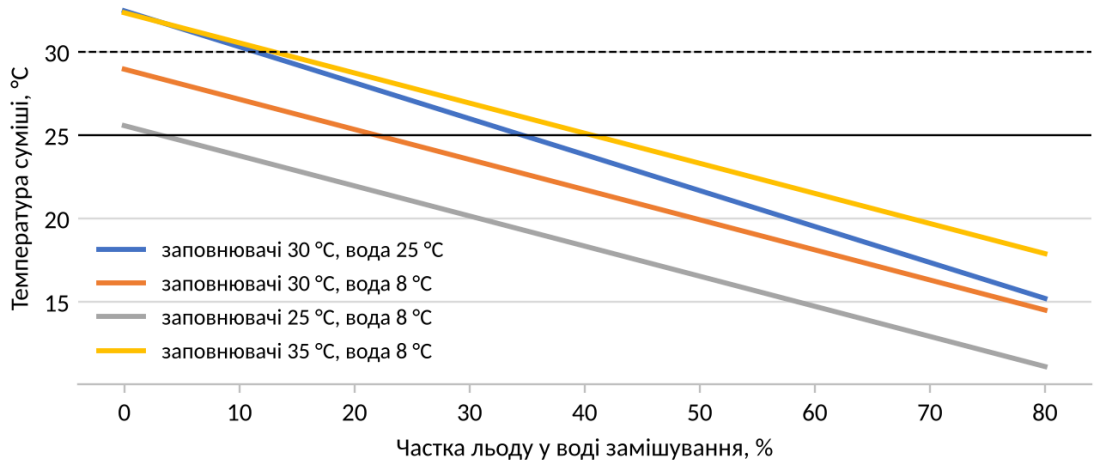


Рис. 3.4 Температура бетонної суміші залежно від частки льоду у воді замішування (розрахунок автора)

Для зниження температури суміші до 25 °C за температури заповнювачів 30 °C і води 8 °C необхідно замінити льодом 22 % води замішування, а за температури заповнювачів 35 °C – 41 %. Це узгоджується з рекомендацією ACI 305R, що лід доцільний тоді, коли охолодженням води і заповнювачів не

вдається досягти потрібної температури [3]. Необхідно забезпечити повне розплавлення льоду до кінця перемішування, тому застосовують лускатий лід і подовжують перемішування.

3.3 Тривалість догляду за методом зрілості

Для бетону С25/30 на портландцементі побудовано криві набору міцності за постійних температур 5…30 °С (рис. 3.5). Розрахунок виконано за формулами (2.3) і (2.4).

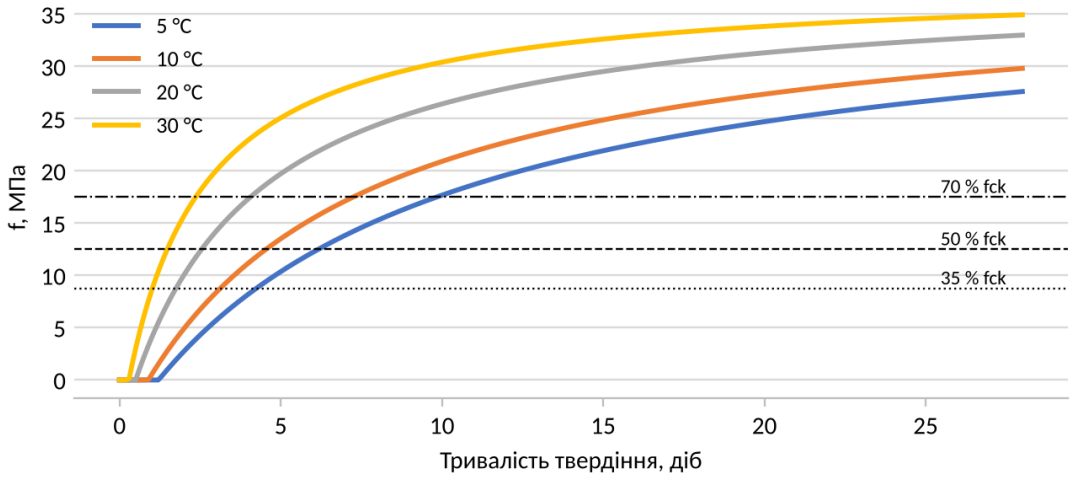


Рис. 3.5 Розвиток міцності бетону С25/30 за різних температур твердіння (розрахунок автора за методом зрілості [8])

Вплив вибору функції зрілості показано на рис. 3.6. За температури 5 °С функція Нурса–Саула дає коефіцієнт віку 0,50, а функція Арреніуса – 0,41; за 35 °С – відповідно 1,50 і 2,22. Таким чином, лінійна функція Нурса–Саула переоцінює зрілість за низьких температур і недооцінює за високих. Для регламенту холодного періоду це означає, що функція Нурса–Саула дає небезпечну оцінку (завищену міцність), тому в регламентах прийнято функцію Арреніуса, рекомендовану ASTM C1074 для широкого діапазону температур [8].

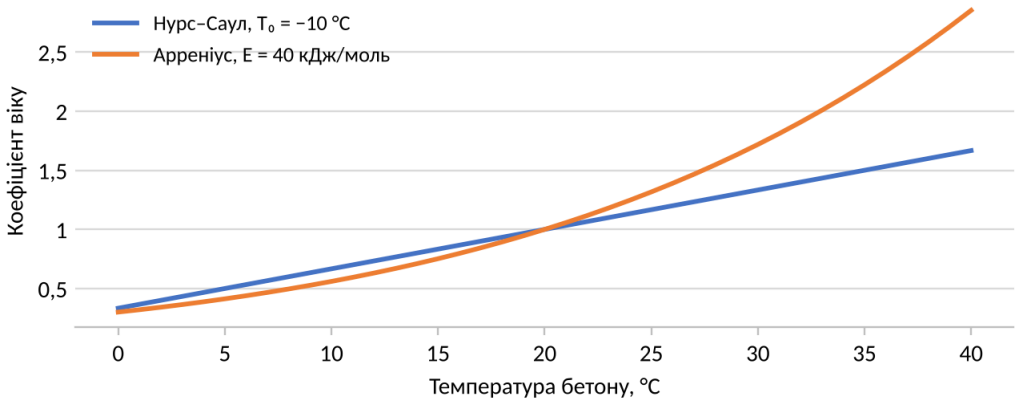


Рис. 3.6 Порівняння функцій зрілості: коефіцієнт еквівалентного віку (розрахунок автора)

Необхідна тривалість догляду для класів 2, 3 і 4 за ДСТУ EN 13670 визначена як час досягнення 35, 50 і 70 % fck = 25 МПа (табл. 3.3, рис. 3.7).

Таблиця 3.3

Розрахункова тривалість догляду за бетоном С25/30, діб (розрахунок автора)

Клас догляду	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
2 (35 % fck)	4,2	3,1	2,3	1,7	1,3	1,0
3 (50 % fck)	6,2	4,5	3,4	2,5	1,9	1,5
4 (70 % fck)	9,8	7,2	5,4	4,1	3,1	2,4

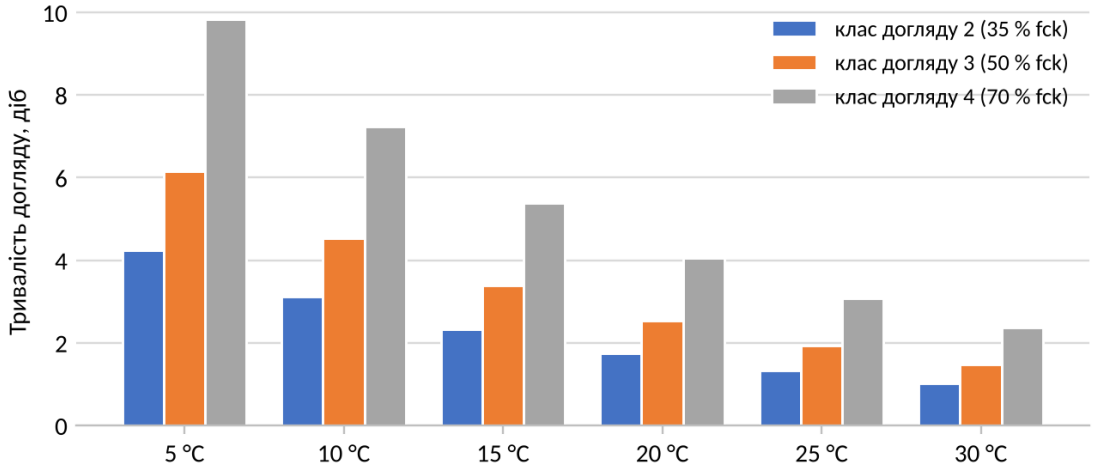


Рис. 3.7 Тривалість догляду залежно від температури бетону і класу догляду (розрахунок автора)

Порівняння з діапазонами табл. 1.2 показує, що розраховані значення потрапляють у межі, наведені для стандарту: за 25 °C для класу 3 отримано 1,9 доби (діапазон 1,5…3,5), для класу 4 – 3,1 доби (3…6); за 5…10 °C для класу 3 –

4,5…6,2 доби (3,5…18). Розраховані значення лежать ближче до нижніх меж, що відповідає бетону із середньою або швидкою швидкістю набору міцності на портландцементі. Для бетонів на цементах CEM III або з великим вмістом золи тривалість догляду буде більшою, тому калібрування методу зрілості для конкретного складу обов'язкове.

Для умов Кропивницького тривалість догляду за класом 3 обчислено за середньомісячною температурою з урахуванням саморозігріву бетону на 3 K (табл. 3.4).

Таблиця 3.4

Тривалість догляду за класом 3 у теплий період, м. Кропивницький, діб (розрахунок автора)

Місяць	**IV**	**V**	**VI**	**VII**	**VIII**	**IX**	**X**
Тривалість, діб	4,0	2,8	2,3	2,1	2,2	2,9	4,2

Отже, влітку достатньо 2…3 діб догляду, а у квітні та жовтні – близько 4 діб. Таке диференціювання дає змогу скоротити тривалість догляду влітку порівняно з усталеною на практиці «тижневою» нормою і, навпаки, не припиняти догляд передчасно в перехідні місяці.

3.4 Холодний період: метод «термоса» для тонкої плити

Розглянуто плиту перекриття товщиною 200 мм на фанерній опалубці (рис. 3.8). Верхню поверхню після бетонування вкривають плівкою і плитами екструдованого пінополістиролу (XPS, $\lambda = 0{,}035$ Вт/(м·К)) товщиною δ; опалубку знизу утеплюють тим самим матеріалом. Бетонна суміш C25/30 на цементі CEM II/A вмістом 350 кг/м³ (Hu = 360 кДж/кг) надходить з температурою +15 °C; температура повітря −10 °C, вітер 5 м/с. Критерієм прийнято досягнення 50 % fck = 12,5 МПа до охолодження бетону до +5 °C.

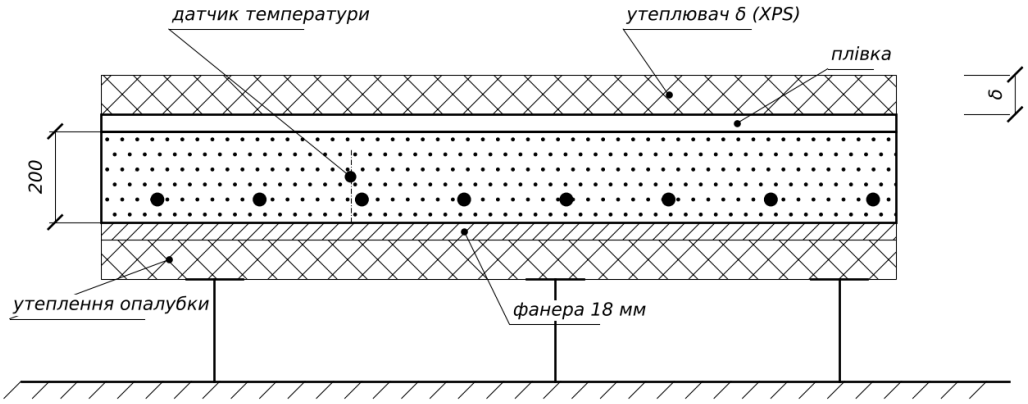


Рис. 3.8 Схема утеплення плити перекриття при бетонуванні методом «термоса»

Розрахункові криві температури бетону наведено на рис. 3.9.

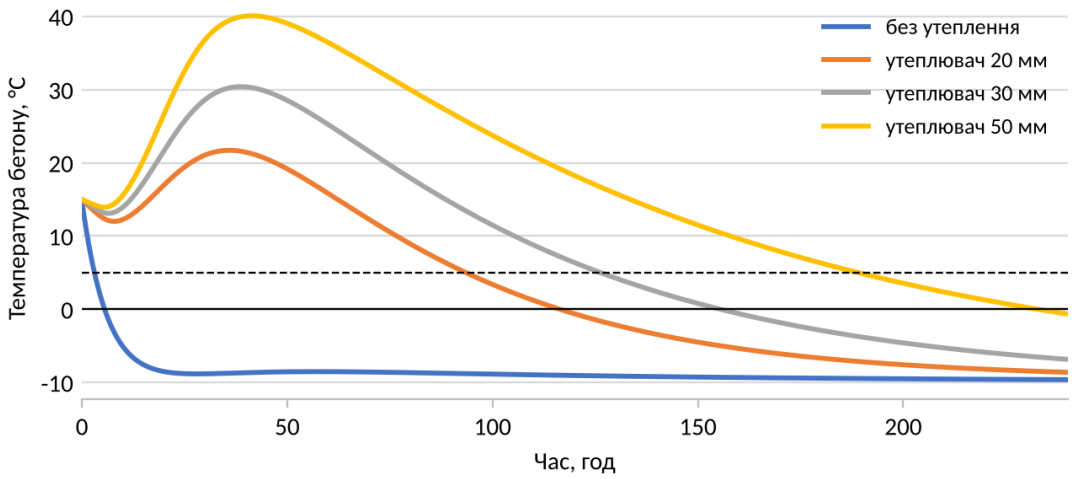


Рис. 3.9 Температура бетону плити 200 мм за Тп = −10 °C залежно від товщини утеплення (розрахунок автора)

Без утеплення плита охолоджується до +5 °C через 3,1 год, ще до початку помітного тепловиділення, і замерзає, не набравши міцності. З утепленням 20 мм максимальна температура становить 21,7 °C, бетон охолоджується до +5 °C через 94 год і набирає за цей час 14,4 МПа, тобто критерій виконується з невеликим запасом. Утеплення 30 і 50 мм дає відповідно 20,4 і 26,8 МПа на момент охолодження до +5 °C (табл. 3.5).

Таблиця 3.5

Результати розрахунку методу «термоса» для плити 200 мм, Тп = −10 °С

Утеплення, мм	Tmax бетону, °С	Час до +5 °С, год	Міцність на цей момент, МПа
0	15,0	3,1	0
20	21,7	93,6	14,4
30	30,4	126,3	20,4
50	40,1	189,1	26,8

Мінімальну товщину утеплення, за якої виконується критерій, визначено для температур повітря від −2 до −20 °С і двох температур суміші (рис. 3.10).

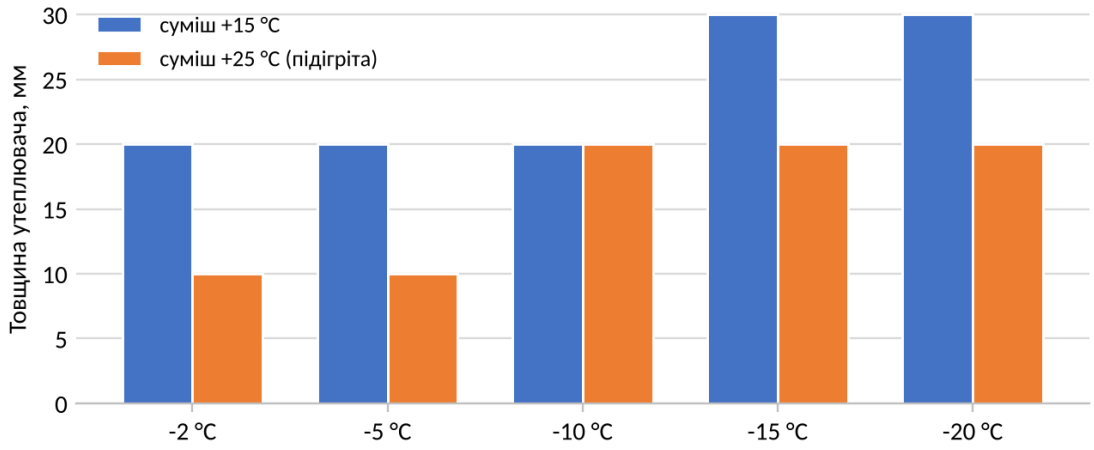


Рис. 3.10 Мінімальна товщина утеплювача XPS для плити 200 мм (розрахунок автора)

За температури суміші +15 °С необхідно 20 мм утеплювача до −10 °С і 30 мм за −15…−20 °С. Підігрів суміші до +25 °С, як у технології «Heating Off» [12], зменшує потрібну товщину до 10 мм за слабких морозів і до 20 мм за −10…−20 °С.

Слід врахувати, що зосереджена модель не враховує крайових ділянок, тепловтрат через колони і стіни, вологих утеплювачів і нерівномірності укриття. Ці ефекти на практиці можуть збільшити тепловтрати в 1,5–2 рази, тому в регламенті Х прийнято коефіцієнт запасу 2: мінімальна товщина утеплення плит – 40 мм за Тп до −10 °С і 60 мм за −10…−20 °С, з обов'язковим контролем температури датчиками в найбільш охолоджуваних місцях (крайові зони, над опорами).

3.5 Масивні конструкції

Розглянуто фундаментну плиту товщиною 2,0 м (рис. 3.11) з бетону С25/30. Адіабатичне підвищення температури $\Delta T_{ад} = Hu \cdot C/(\rho c)$ для різних цементів наведено в табл. 3.6.

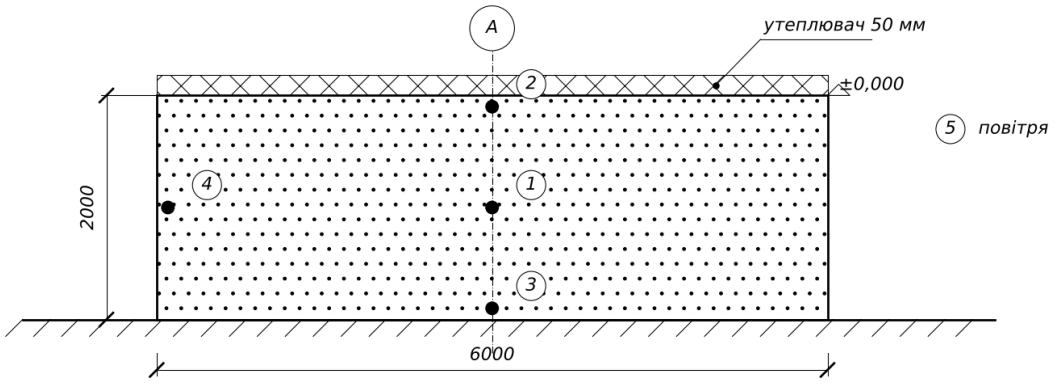


Рис. 3.11 Схема розміщення датчиків температури в масивній фундаментній плиті: 1 – ядро; 2 – поверхня; 3 – підошва; 4 – бічна грань; 5 – повітря

Таблиця 3.6

Адіабатичне підвищення температури бетону (розрахунок автора)

Цемент, вміст	**Hu, кДж/кг**	**C, кг/м³**	**ΔTад, K**
CEM I 42,5	460	400	76,7
CEM II/A	400	350	58,3
CEM III/A	320	330	44,0

Розв'язання рівняння (2.6) для CEM II/A та температури укладання і повітря 20 °C наведено на рис. 3.12.

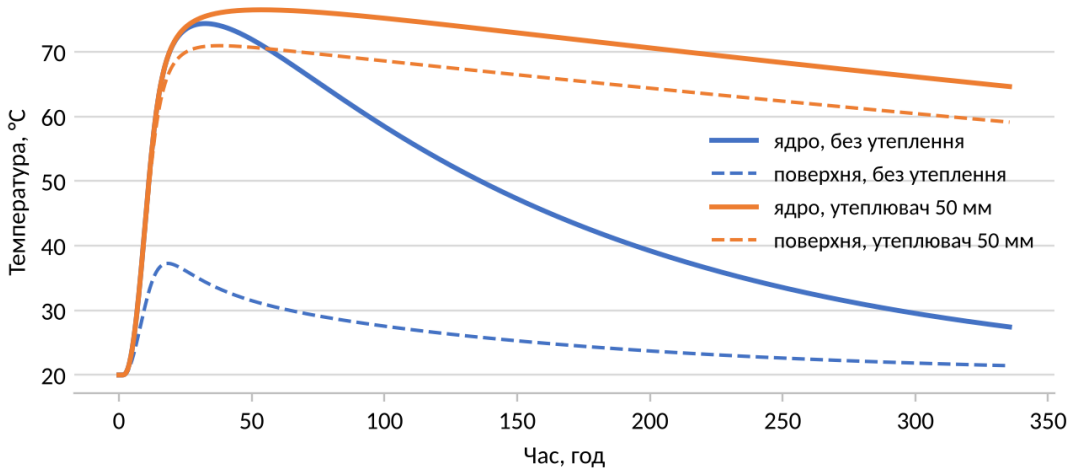


Рис. 3.12 Температура в ядрі та на поверхні плити товщиною 2 м (розрахунок автора)

Без утеплення максимальна температура ядра становить 74,4 °C, а перепад ядро – поверхня досягає 40,9 K, що вдвічі перевищує допустиме значення 19 °C. З утеплювачем 50 мм перепад знижується до 6,6 K, але температура ядра зростає до 76,5 °C. Отже, утеплення вирішує проблему перепаду, а проблему перегріву (ризик DEF) необхідно розв'язувати складом бетону і температурою укладання.

Залежність максимальної температури від температури укладання для трьох цементів наведено на рис. 3.13 і в табл. 3.7.

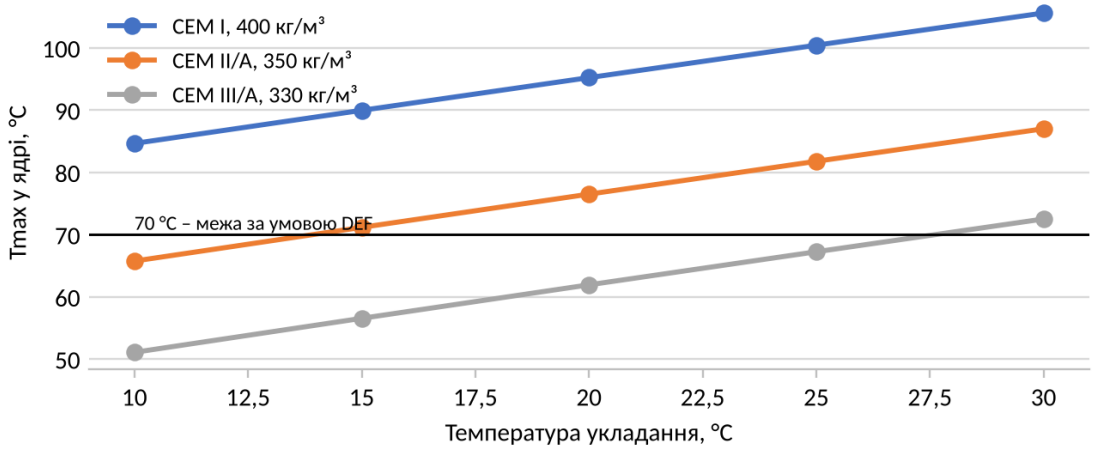


Рис. 3.13 Максимальна температура ядра плити 2 м залежно від температури укладання (розрахунок автора)

Таблиця 3.7

Максимальна температура ядра, °C, за утеплення 50 мм (розрахунок автора)

Цемент	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
CEM I, 400 кг/м³	84,7	90,0	95,2	100,5	105,6
CEM II/A, 350 кг/м³	65,8	71,2	76,5	81,8	87,0
CEM III/A, 330 кг/м³	51,1	56,6	62,0	67,3	72,5

Висновок однозначний: бетон на CEM I з вмістом 400 кг/м³ не може бути застосований у конструкції товщиною 2 м за жодної реальної температури укладання. Для CEM II/A межа 70 °C виконується лише за температури укладання близько 14 °C і нижче, тобто влітку необхідне охолодження суміші. Цемент CEM III/A (шлакопортландцемент) забезпечує Tmax < 70 °C до температури укладання близько 27 °C.

Аналіз чутливості (рис. 3.14) показує, що зміна вмісту цементу або його теплоти гідратації на ±10 % змінює Tmax на ±6 K, зміна температури укладання на ±5 K – на ±5,3 K, а товщина утеплювача від 25 до 100 мм – лише на ±0,4 K.

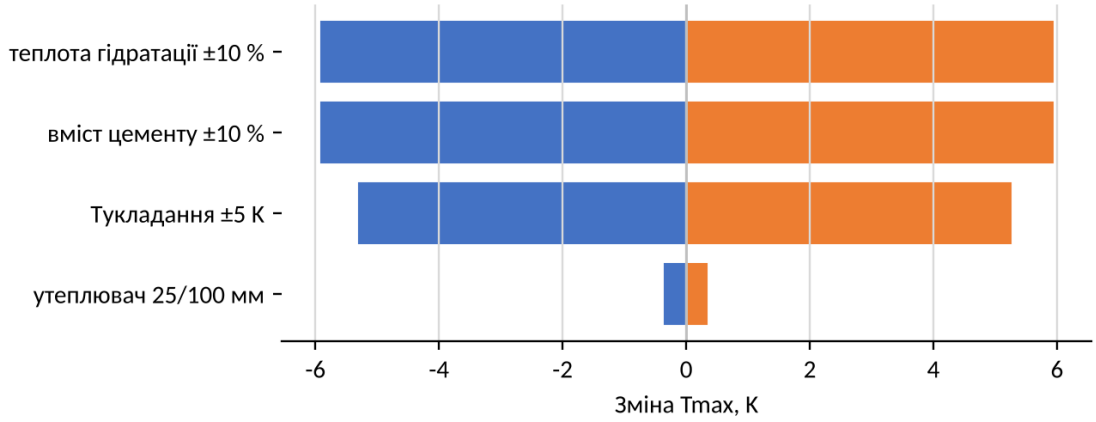


Рис. 3.14 Чутливість максимальної температури ядра до параметрів (базовий варіант 76,5 °C, розрахунок автора)

Для перевірки моделі розділу 2 виконано розрахунок плит різної товщини для умов, близьких до досліджених П. Чоктавікарном і С. Тангтермсірікулом [24]: температура укладання 30 °C, повітря 29 °C, в'яжуче 424 кг/м³ (50 % золи-винесення), повільне тепловиділення. Дані джерела оцифровано і апроксимовано залежністю Tmax = 10,49·ln H + 58,59 (R^2 = 0,992). Результати порівняння наведено на рис. 3.15.

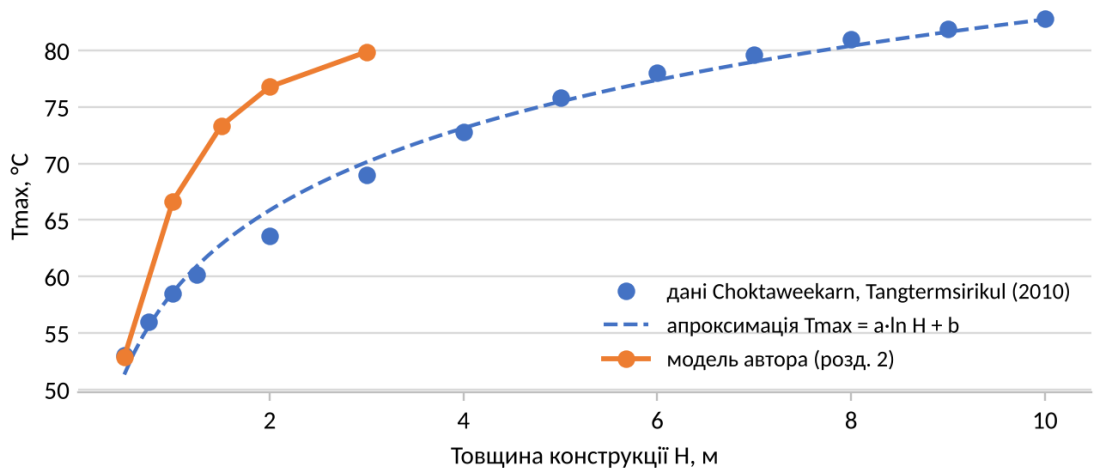


Рис. 3.15 Максимальна температура залежно від товщини плити: дані [24] і розрахунок автора

Для товщини 0,5 м модель дає 52,9 °C проти 53 °C за даними джерела, для 1…3 м – на 8…11 K більше (66,7…79,9 °C проти 58,5…69 °C). Розбіжність пояснюється тим, що одновимірна модель не враховує тепловідведення в основу і бічними гранями та прийнятої в джерелі кінетики тепловиділення золи; для регламенту така похибка йде в запас, оскільки завищує прогнозовану температуру. Характер залежності – швидке зростання Tmax до товщини 2 м і наближення до адіабатичного значення далі – в обох розрахунках однаковий.

Отже, головним керованим параметром регламенту М є склад бетону (вид і кількість цементу), другим – температура укладання; утеплення слугує засобом керування перепадом і на максимальну температуру майже не впливає.

Висновки до розділу 3

1. Для середніх умов липневого дня в Кропивницькому інтенсивність випаровування становить 0,70 кг/(м²·год); ймовірність перевищення 0,5 кг/(м²·год) у червні – серпні становить 57…68 %, тому захист поверхні в ці місяці має бути обов'язковим.

2. Температура суміші за жаркої погоди досягає 32,5 °C; найефективнішим заходом є охолодження заповнювачів (−0,7 K на 1 K), за температури заповнювачів 35 °C потрібна заміна 41 % води льодом.

3. Тривалість догляду за класом 3 для бетону C25/30 становить 1,5…2,5 доби за 20…30 °C і 4,5…6,2 доби за 5…10 °C; для Кропивницького – 2,1…2,9 доби влітку і близько 4 діб у квітні та жовтні. Функція Нурса–Саула завищує зрілість за низьких температур, тому слід застосовувати функцію Арреніуса.

4. Для плити 200 мм за −10 °C метод «термоса» можливий за утеплення не менше 20 мм (розрахунково), у регламенті прийнято 40…60 мм з урахуванням коефіцієнта запасу 2.

5. Для плити товщиною 2 м перепад ядро – поверхня без утеплення становить 40,9 K, з утепленням 50 мм – 6,6 K; максимальна температура визначається насамперед складом бетону і температурою укладання, межа 70 °C забезпечується цементом CEM III/A до Тукл ≈ 27 °C.

Розділ 4
РЕГЛАМЕНТИ БЕТОНУВАННЯ ТА ПРИКЛАД ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

4.1 Структура регламенту і алгоритм його вибору

Регламент бетонування розглядається як розділ специфікації виконання за ДСТУ EN 13670 [1] і проєкту виконання робіт. Він містить: умови застосування; вимоги до складу і температури суміші; заходи під час транспортування, укладання й ущільнення; спосіб і тривалість догляду та захисту; систему контролю температури і міцності; критерії розпалублення та припинення захисту; відповідальних осіб і форми документування.

Вибір регламенту здійснюється за алгоритмом, наведеним на рис. 4.1. Вихідними даними є прогноз погоди на період захисту (не менше трьох діб), тип і розміри конструкції та склад бетону.

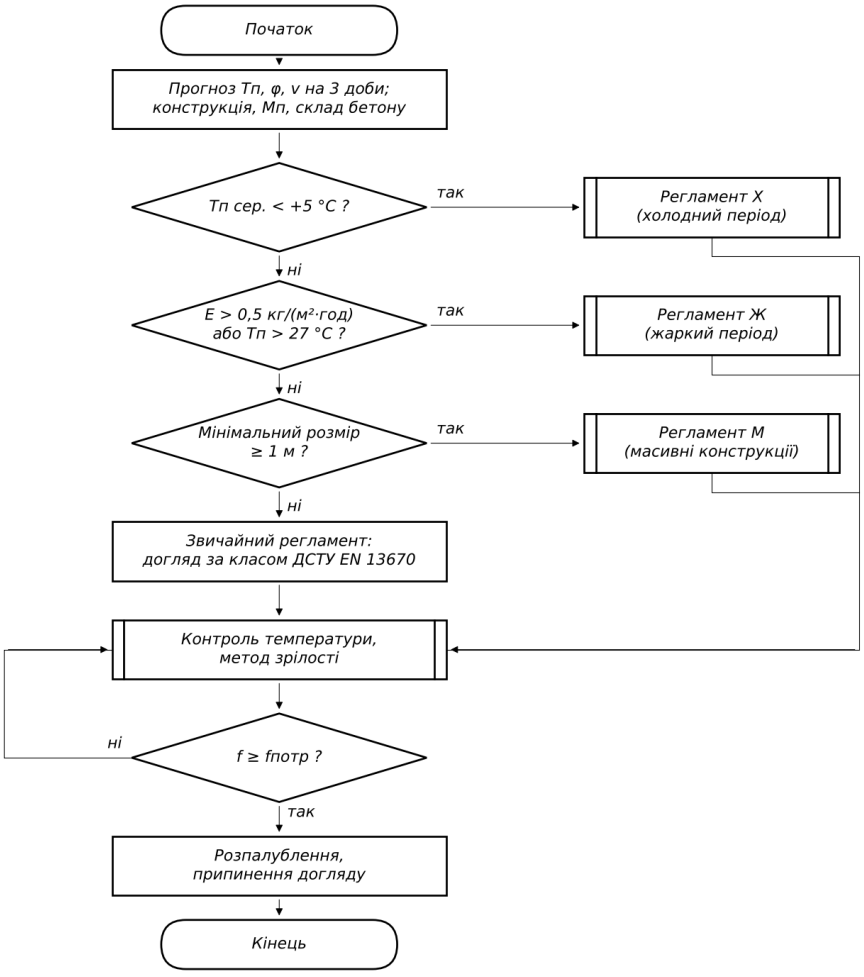


Рис. 4.1 Блок-схема алгоритму вибору регламенту бетонування

Алгоритм передбачає, що регламенти можуть поєднуватися: масивна фундаментна плита взимку бетонується за регламентами М і Х одночасно, влітку – М і Ж. Незалежно від регламенту завершальним етапом є контроль температури і оцінювання міцності методом зрілості, за результатами якого приймається рішення про розпалублення і припинення догляду.

4.2 Регламент Х – бетонування в холодний період

Основні вимоги регламенту холодного періоду зведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Регламент Х: бетонування за середньодобової температури нижче +5 °С

Етап	Вимоги і заходи
Склад бетону	Цемент CEM I або CEM II/A класу 42,5R; В/Ц ≤ 0,50; прискорювачі або протиморозні добавки за погодженням з проєктувальником; добавки з хлоридами в залізобетоні не застосовувати
Суміш	Температура при постачанні не нижче +10 °С, при укладанні +15…+25 °С; заповнювачі без льоду і смерзлих грудок
Підготовка	Очищення опалубки й арматури від снігу та льоду; основа не мерзла; утеплення опалубки заздалегідь
Укладання	Без перерв; транспортування в утеплених автобетонозмішувачах; укривання відкритих поверхонь одразу після загладжування
Догляд і захист	Метод «термоса»: утеплення плит не менше 40 мм XPS до −10 °С, 60 мм до −20 °С; за нижчих температур або Мп > 10 – прогрів (проводи, термоактивна опалубка, тепляк)
Контроль	Датчики температури: не менше 1 на 50 м³ і в крайових зонах; запис кожні 30 хв; оцінювання міцності за функцією Арреніуса
Критерій припинення захисту	$f \geq 3{,}5$ МПа для ненавантажених і $f \geq 50\ \%\ f_{ck}$ для навантажених конструкцій; різниця температур бетону і повітря під час зняття утеплення ≤ 20 К

Ключова особливість регламенту – перехід від фіксованої тривалості захисту до критерію за досягнутою міцністю, оціненою за фактичною температурою. Це дає змогу не утримувати утеплення довше потрібного у відлиги і, навпаки, не знімати його передчасно під час тривалих морозів.

4.3 Регламент Ж – бетонування в жаркий період

Вимоги регламенту жаркого періоду наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Регламент Ж: бетонування за E > 0,5 кг/(м²·год) або Тп > 27 °С

Етап	Вимоги і заходи
Планування	Розрахунок E за прогнозом на години бетонування за формулою Уно; бетонування горизонтальних поверхонь у ранкові й вечірні години, за E > 1,0 – переважно вночі
Склад бетону	Уповільнювачі тужавлення і пластифікатори; цементи з помірним тепловиділенням; додавання води на майданчику заборонено
Суміш	Температура при укладанні не вище +30 °С; заповнювачі в затінку із зволоженням; охолоджена вода; за Тзап > 30 °С – лід (20…40 % води)
Підготовка	Зволоження основи й опалубки, затінення опалубки й арматури; готовність засобів догляду до початку бетонування
Укладання	Мінімальна тривалість транспортування; безперервне укладання; за E > 1,0 – вітрозахисні екрани, туманоутворення над поверхнею
Догляд	Плівкоутворювальний склад або плівка одразу після загладжування; вологий догляд; тривалість за класом 3 – не менше 2…3 діб за методом зрілості
Контроль	Температура суміші кожної машини; температура, вологість і вітер щогодини; огляд поверхні на пластичні тріщини, їх затирання до тужавлення

У регламенті закладено «двоступеневу» логіку: за 0,5 < E ≤ 1,0 кг/(м²·год) застосовуються стандартні заходи – укривання і плівкоутворювальні склади, а за E > 1,0 кг/(м²·год) додаються екрани, туманоутворення і перенесення робіт на нічний час. Для Кропивницького друга група заходів, за результатами підрозд. 3.1, потрібна в 13…20 % днів червня – серпня.

4.4 Регламент М – масивні конструкції

Вимоги регламенту для масивних конструкцій наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Регламент М: конструкції з мінімальним розміром ≥ 1,0 м

Етап	Вимоги і заходи
План температурного контролю	Розрахунок Tmax і ΔT до початку робіт; узгодження з проєктувальником
Склад бетону	Цементи CEM III/A, CEM II/B-S або з золою-винесенням; мінімально необхідний вміст цементу; оцінювання міцності у віці 56 діб за погодженням

Продовження таблиці 4.3

Етап	Вимоги і заходи
Температура укладання	Не вище розрахункової (для CEM II/A – близько 14 °C, для CEM III/A – близько 27 °C при товщині 2 м); у жаркий період – охолодження суміші
Гранична температура	Tmax ≤ 70 °C; перепад ядро – поверхня ≤ 19…20 °C
Захист	Утеплення поверхні 50 мм XPS або еквівалентне; зняття утеплення поступово, коли ΔT з повітрям < 20 K
Контроль	Датчики в ядрі, на поверхні, в підошві, на бічній грані і в повітрі (див. рис. 3.11); реєстрація до стабілізації температури ядра
Дії при відхиленнях	За ΔT > 17 K – додаткове утеплення; за Tmax, що наближається до 65 °C, – припинення вкладання в наступні яруси до охолодження

4.5 Приклад застосування регламентів

Застосування регламентів розглянуто на прикладі зведення монолітного каркасного житлового будинку в м. Кропивницькому: фундаментна плита товщиною 1,2 м, колони 400×400 мм, плити перекриття 200 мм, бетон C25/30. Зведення каркаса триває протягом року. Календар застосування регламентів і основних заходів наведено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Календар регламентів бетонування для об'єкта в м. Кропивницькому

Місяць	Регламент	Основні заходи
XII–II	X	Суміш +15…+25 °C, утеплення плит 60 мм, колон – утеплена опалубка; датчики; захист до 50 % fck
III, XI	X	Утеплення 40 мм, контроль нічних температур; прискорювачі
IV, X	Звичайний / X вночі	Укривання плівкою і утеплювачем на ніч; догляд ≈ 4 доби
V, IX	Звичайний / Ж за прогнозом	Розрахунок E щоденно; за E > 0,5 – плівкоутворювальні склади; догляд ≈ 3 доби
VI–VIII	Ж	Бетонування плит вранці та ввечері; Tсуміші ≤ 30 °C; захист поверхні обов'язковий; догляд ≥ 2…3 доби
Будь-який	M (фундаментна плита)	CEM III/A або CEM II/B-S; Tукл ≤ 20 °C влітку; утеплення 50 мм; датчики в 5 точках

Розрахунок за моделлю підрозд. 3.5 для плити товщиною 1,2 м на цементі CEM II/A з утепленням 50 мм за температури укладання 20 °C дає нижчу, ніж

для плити 2 м, максимальну температуру, проте з огляду на чутливість до складу бетону для фундаменту рекомендовано цемент CEM III/A, який забезпечує запас до межі 70 °C у будь-який сезон.

Порівняно з поширеною практикою, за якої догляд за бетоном незалежно від сезону триває 7 діб, а зимове утеплення призначається без розрахунку, регламенти дають змогу скоротити тривалість догляду влітку до 2…3 діб (без зниження класу догляду), обґрунтувати товщину утеплення взимку і запобігти перегріву масивного бетону.

Висновки до розділу 4

1. Розроблено структуру регламенту бетонування як розділу специфікації виконання за ДСТУ EN 13670 і алгоритм вибору регламенту за прогнозом погоди та розмірами конструкції.

2. Розроблено регламенти Х, Ж і М у вигляді таблиць вимог за етапами робіт із кількісними значеннями, обґрунтованими в розділі 3.

3. Складено календар застосування регламентів для об'єкта в м. Кропивницькому: регламент Х – листопад – березень, регламент Ж – червень – серпень, у травні та вересні – за щоденним прогнозом, регламент М – для фундаментної плити незалежно від сезону.

Розділ 5
ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Бетонні роботи в особливих кліматичних умовах поєднують загальні небезпеки будівельного майданчика з додатковими чинниками, пов'язаними саме з регламентами Х, Ж і М: перегріванням або переохолодженням працівників, ураженням електричним струмом під час електропрогріву, отруєнням продуктами згоряння в тепляках, підвищеним шумом вібраторів і бетононасоса, слизькістю обмерзлих поверхонь і роботою в темний час доби. Загальні вимоги до організації безпечного виконання робіт встановлюють Закон України «Про охорону праці» [26] і ДБН А.3.2-2-2009 [27]. Аналіз факторів і заходів захисту наведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Небезпечні та шкідливі фактори і заходи захисту під час бетонування

Фактор	Коли виникає	Заходи захисту
Нагрівальний мікроклімат	Регламент Ж, пряме сонце	Перенесення робіт на ранок і вечір, навіси, питний режим, перерви в тіні [28]
Охолоджувальний мікроклімат	Регламент Х	Утеплений спецодяг, приміщення для обігріву, регламентовані перерви [28]
Ураження електричним струмом	Електропрогрів, вібратори	Знижена напруга, огородження зони, заземлення, допуск підготовленого персоналу [29]
Отруєння оксидом вуглецю	Газові теплові гармати в тепляках	Відведення продуктів згоряння назовні, вентиляція, газоаналізатор
Шум і вібрація	Вібратори, бетононасос, генератор	Віднесення джерел, засоби захисту органів слуху, чергування операцій [30]
Падіння з висоти, слизькість	Перекриття, лід, плівки, темрява	Огородження перепадів, очищення від снігу й льоду, освітлення, протиковзке взуття
Рухомі машини	Автобетонозмішувачі, стріла бетононасоса	Небезпечна зона, сигнальник, заборона перебування під стрілою

Найбільш небезпечними з цього переліку є ураження струмом і отруєння в тепляках, оскільки вони можуть призвести до тяжких наслідків за короткий час. Тому для них у підрозділах 5.4 і 5.5 розроблено схеми організації робочих місць.

5.2 Організація робочих місць під час бетонування

Під час подавання суміші бетононасосом навколо стріли і автобетонозмішувача встановлюють небезпечну зону, межі якої позначають на місцевості й у проєкті виконання робіт. Перебування людей під стрілою та між автобетонозмішувачем і бетононасосом заборонено; маневрування машин виконується за сигналами призначеного сигнальника. Робоче місце бетонника на перекритті має огородження по краю, а переходи по арматурі влаштовують з інвентарних трапів.

У холодний період робочі місця, трапи та риштування очищають від снігу й льоду перед початком зміни і посипають піском. Оскільки зимою бетонування часто продовжується в темний час доби, як показав розглянутий у підрозд. 1.8 випадок, регламент X передбачає штучне освітлення робочих місць і заборону продовження робіт за сильного снігопаду без укриття.

У жаркий період роботи на відкритих перекриттях переносяться на ранкові й вечірні години, що одночасно зменшує випаровування з бетону і тепловий вплив на працівників. На майданчику облаштовують затінені місця відпочинку та забезпечують працівників питною водою; керівник робіт стежить за самопочуттям бригади і за потреби збільшує тривалість перерв. Вимоги до мікроклімату встановлено санітарними нормами [28].

5.3 Розрахунок рівня шуму в зоні бетонування

Під час бетонування перекриття в зоні роботи бетонника одночасно діють два глибинні вібратори (по 91 дБА), бетононасос (88 дБА) і генератор для електропрогріву (85 дБА). Сумарний рівень звуку:

$$L_{\Sigma} = 10 \cdot \lg \Sigma\, 10^{0,1L_\{i\}} = 10 \cdot \lg(2 \cdot 10^{9,1} + 10^{8,8} + 10^{8,5}) = 95,4 \text{ дБА} \qquad (5.1)$$

де L_i – рівні звуку окремих джерел, дБА.

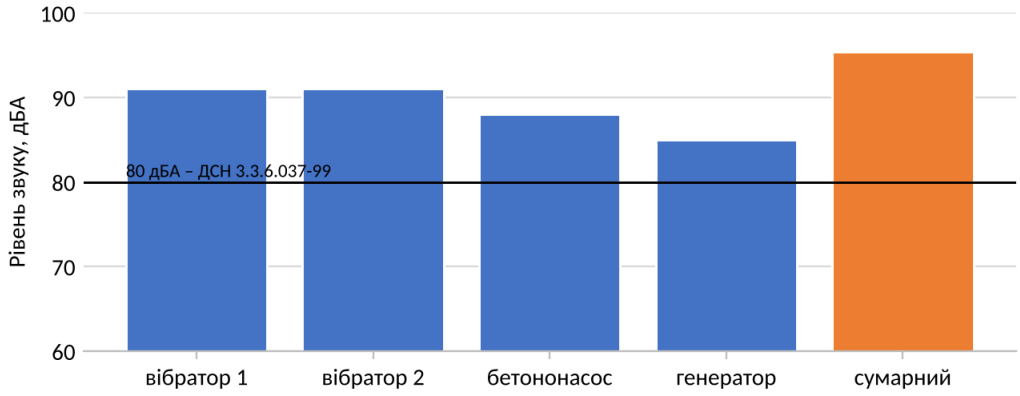


Рис. 5.1 Рівні звуку джерел і сумарний рівень у зоні бетонування (розрахунок автора)

Сумарний рівень 95,4 дБА перевищує допустимий рівень 80 дБА за ДСН 3.3.6.037-99 [30] на 15,4 дБА (рис. 5.1). Найбільший внесок дають вібратори, тому самого віднесення бетононасоса і генератора недостатньо. Передбачено: розміщення генератора і бетононасоса не ближче ніж 15 м від робочих місць, навушники або вкладиші з ефективністю не менше 20 дБА для бетонників, чергування операцій з вібруванням між членами бригади.

5.4 Електробезпека під час електропрогріву бетону

Електропрогрів нагрівальними проводами є найпоширенішим способом зимового бетонування перекриттів і водночас джерелом підвищеної небезпеки: напруга подається на проводи, закладені у вологий бетон, а роботи ведуться на відкритому повітрі в умовах снігу. Вимоги до експлуатації таких електроустановок встановлюють Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів [29]. Схему організації ділянки електропрогріву наведено на рис. 5.2.

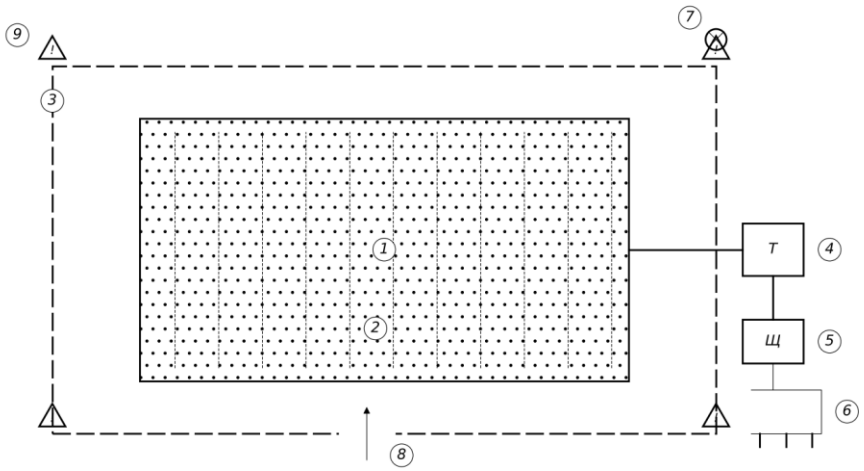


Рис. 5.2 Схема ділянки електропрогріву перекриття: 1 – плита, що прогрівається; 2 – нагрівальні проводи; 3 – інвентарне огородження; 4 – понижувальний трансформатор; 5 – розподільчий щит з апаратами захисту; 6 – контур заземлення; 7 – сигнальна лампа «Напруга ввімкнена»; 8 – вхід для персоналу; 9 – попереджувальні знаки

Для ділянки прийнято такі вимоги:

– монтаж, підключення і обслуговування схеми прогріву виконує персонал з групою з електробезпеки не нижче III; сторонні особи в зону не допускаються;

– зону огороджують інвентарним огородженням з попереджувальними знаками, а на час подачі напруги вмикають сигнальну лампу, видиму з усіх підходів;

– корпуси трансформатора і щита заземлюють, перед подачею напруги перевіряють ізоляцію кабелів і цілісність нагрівальних проводів;

– температуру бетону контролюють дистанційними датчиками, а вимірювання вручну виконують лише за вимкненої напруги;

– поливати бетон водою і ходити по плиті під напругою заборонено.

Розглянутий у підрозд. 1.8 випадок, коли нагрівачі вийшли з ладу ще до початку прогріву [10], показує, що перевірка схеми до бетонування потрібна не лише для якості бетону, а й для безпеки: пошкоджені проводи є місцями можливого замикання.

5.5 Вентиляція тепляка з тепловою гарматою

Під час прогріву бетону в тепляку газовою тепловою гарматою потужністю 20 кВт витрата пропану становить 20 / 46,4 · 3,6 = 1,55 кг/год. За прийнятого питомого виділення оксиду вуглецю 2 г на 1 кг палива (для неповністю налагодженого пальника) інтенсивність виділення CO дорівнює G = 1,55 · 2000 = 3103 мг/год. Необхідний повітрообмін:

$$L = G / (C_{доп} - C_{пр}) = 3103 / (20 - 1) = 163 \text{ м}^3/\text{год} \qquad (5.2)$$

де $C_{доп} = 20$ мг/м³ – гранично допустима концентрація CO в повітрі робочої зони; $C_{пр} = 1$ мг/м³ – концентрація CO в припливному повітрі.

Для тепляка об'ємом 300 м³ це відповідає кратності повітрообміну близько 0,5 год⁻¹, яку не можна гарантувати лише за рахунок нещільностей тенту, особливо після його ретельного утеплення. Тому в регламенті X прийнято схему, наведену на рис. 5.3: гармату непрямого нагріву з відведенням продуктів згоряння назовні, організований приплив свіжого повітря не менше 200 м³/год, витяжний отвір у верхній частині тенту і газоаналізатор CO зі звуковим сигналом.

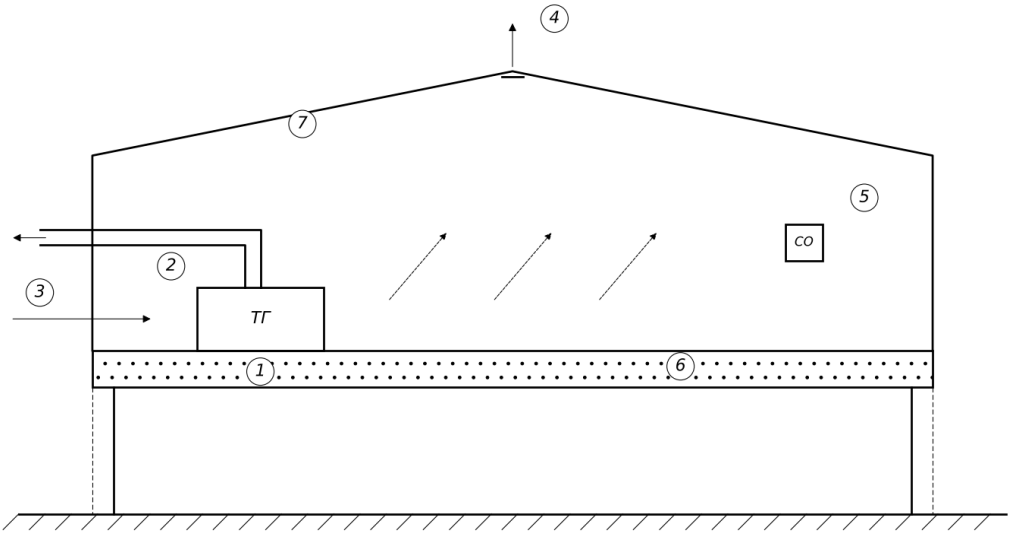


Рис. 5.3 Схема тепляка з тепловою гарматою: 1 – теплова гармата; 2 – відведення продуктів згоряння назовні; 3 – приплив свіжого повітря; 4 – витяжний отвір; 5 – газоаналізатор CO; 6 – плита, що прогрівається; 7 – тент на каркасі

Перебування людей у тепляку під час роботи гармати прямого нагріву заборонено. Перед входом у тепляк після прогріву його провітрюють, а показання газоаналізатора перевіряють.

5.6 Безпека в надзвичайних ситуаціях

В умовах воєнного стану будівельний майданчик повинен мати план дій під час сигналу «Повітряна тривога». Працівники припиняють роботи, знеструмлюють обладнання електропрогріву, зупиняють бетононасос і переходять до найближчої захисної споруди або укриття, що відповідає ДБН В.2.2-5:2023 [7]. Технологічні перерви, викликані тривогою, мають бути враховані в регламенті: місця можливих робочих швів визначають заздалегідь, а суміш з уповільнювачем тужавлення дає змогу продовжити бетонування без утворення «холодного» шва після перерви до 1,5…2 год.

Під час перерви поверхню бетону негайно вкривають, щоб запобігти пересиханню влітку і переохолодженню взимку. Електропрогрів після відбою вмикає лише відповідальна особа після огляду ділянки. Для захисних споруд, що зводяться за ДБН В.2.2-5:2023, регламент М набуває особливого значення, оскільки товщина їх огороджувальних конструкцій часто перевищує 0,5…1,0 м.

Висновки до розділу 5

1. Визначено небезпечні та шкідливі фактори бетонування в особливих кліматичних умовах і заходи захисту від них; найнебезпечнішими є ураження струмом під час електропрогріву та отруєння в тепляках.

2. Сумарний рівень шуму в зоні бетонування перевищує норму, тому передбачено віднесення джерел шуму, засоби захисту органів слуху й чергування операцій.

3. Розроблено схему ділянки електропрогріву з огородженням, сигналізацією і заземленням та схему тепляка з відведенням продуктів згоряння, припливом повітря і газоаналізатором; розрахований повітрообмін тепляка – 163 м³/год, у регламенті прийнято не менше 200 м³/год.

4. Сформульовано дії персоналу за сигналу «Повітряна тривога» з урахуванням технологічних перерв бетонування.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Чинний в Україні ДСТУ EN 13670:2023 не містить готових правил для зимового чи літнього бетонування, тому заходи для кожного об'єкта потрібно обґрунтовувати в специфікації виконання; розрахункові методи й граничні значення доцільно брати з керівництв Американського інституту бетону.

2. Огляд натурних досліджень показав, що порушення регламенту в мороз може знизити міцність бетону на цілий клас, а в масивних конструкціях різних країн температура ядра однаково зростає приблизно на 1,2 градуса на кожні 10 кг цементу.

3. Для Кропивницького холодний період триває п'ять місяців, жаркий – три, тому потрібні окремі регламенти для холодного періоду, для жаркого періоду і для масивних конструкцій.

4. У червні – серпні в більшості днів випаровування з поверхні бетону перевищує безпечний рівень, тому захист свіжого бетону від висихання в ці місяці має бути обов'язковим.

5. У спеку бетонну суміш треба охолоджувати, насамперед затіненням і зволоженням заповнювачів, а за дуже високої температури – заміною частини води льодом.

6. Тривалість догляду за бетоном слід визначати за фактичною температурою методом зрілості: влітку достатньо двох-трьох діб, навесні й восени – близько чотирьох.

7. Плиту перекриття взимку можна бетонувати без прогріву, якщо суміш підігріта, а плиту й опалубку утеплено шаром 40–60 мм із контролем температури датчиками.

8. Для масивних конструкцій утеплення зменшує перепад температур між ядром і поверхнею, але від перегріву захищає лише правильний вибір цементу і зниження температури укладання.

9. На основі розрахунків розроблено три регламенти, алгоритм їх вибору, календар застосування для об'єкта в Кропивницькому та заходи з охорони праці, зокрема схеми безпечної організації електропрогріву і тепляка.

GENERAL CONCLUSIONS

1. DSTU EN 13670:2023, now in force in Ukraine, contains no ready-made rules for cold or hot weather concreting, so the measures for each project must be justified in the execution specification; calculation methods and limit values are best taken from the American Concrete Institute guides.

2. The review of field studies showed that a breach of the cold weather regulation can lower the concrete strength by a whole class, and that in mass concrete in different countries the core temperature rises by about 1.2 degrees for every 10 kg of cement.

3. In Kropyvnytskyi the cold period lasts five months and the hot period three months, so separate regulations are needed for cold weather, for hot weather and for mass concrete.

4. In June – August, evaporation from the concrete surface exceeds the safe level on most days, so protecting fresh concrete from drying must be mandatory in these months.

5. In hot weather the fresh concrete must be cooled, first of all by shading and wetting the aggregates and, in very hot conditions, by replacing part of the mixing water with ice.

6. The curing duration should be determined from the actual temperature by the maturity method: two to three days are enough in summer and about four days in spring and autumn.

7. A floor slab can be concreted in winter without heating if the mix is preheated and the slab and formwork are insulated with a 40–60 mm layer, with the temperature monitored by sensors.

8. In mass concrete, insulation reduces the core-to-surface temperature difference, but only the right choice of cement and a lower placing temperature protect it from overheating.

9. On the basis of the calculations, three regulations, an algorithm for selecting them, an application calendar for a site in Kropyvnytskyi and occupational safety measures, including safe layouts for electric heating and heated enclosures, were developed.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ EN 13670:2023. Виконання бетонних конструкцій (EN 13670:2009, IDT). [Чинний від 2023-10-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2023. (Національний стандарт України).

2. ACI PRC-306-16. Guide to Cold Weather Concreting (ACI 306R-16). Farmington Hills : American Concrete Institute, 2016. 24 p.

3. ACI PRC-305-20. Guide to Hot Weather Concreting (ACI 305R-20). Farmington Hills : American Concrete Institute, 2020. URL: https://conrec.ac.ir/wp-content/uploads/2024/08/ACI-305-20.pdf (дата звернення: 14.09.2026).

4. ACI 301-20. Specifications for Concrete Construction. Farmington Hills : American Concrete Institute, 2020. 69 p.

5. Якименко О. В., Кондращенко О. В., Атинян А. О. Бетонні роботи : монографія. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. URL: https://eprints.kname.edu.ua/50234/ (дата звернення: 03.10.2026).

6. Кіракевич І. І., Саницький М. А., Чайковська Р. В. Технологія самоущільнювальних бетонів, що тверднуть у різних температурних умовах. Теорія і практика будівництва : вісник Національного університету «Львівська політехніка». 2015. С. 155–159. URL: https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/jun/4207/26165.pdf (дата звернення: 22.09.2026).

7. ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту. Київ : Мінрегіон України, 2023.

8. ASTM C1074-19. Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method. West Conshohocken : ASTM International, 2019. 10 p.

9. Freiesleben Hansen P., Pedersen E. J. Maturity computer for controlled curing and hardening of concrete. Nordisk Betong. 1977. No. 1. P. 19–34.

10. Owczarska K., Szmigiera E., Woyciechowski P. Evaluation of the effects of frozen concrete in the slab – problems of electroheating. Structural Failures Vademecum 2022 / ed. J. Błyszko. Szczecin : West Pomeranian University of Technology, 2022. P. 22–26.

11. How to pour concrete in freezing conditions : e-book. Version 1.0. CANZAC Group ; Converge, 2024. 12 p.

12. Миколаєць М., Шейніч Л., Сурмачевський А., Бугайчук М., Пушкарьова К. Зимове бетонування за технологією «Heating Off Technology». Наука та будівництво. 2023. № 3. DOI: https://doi.org/10.33644/2313-6679-3-2023-10.

13. Concrete curing to EN 13670: classes, durations and method. Ecobeton UK. URL: https://www.ecobeton.co.uk/blog/concrete-protection-1/curing-concrete-properly-what-en-13670-asks-for-and-the-easiest-way-to-do-it-53 (дата звернення: 08.09.2026).

14. Uno P. J. Plastic shrinkage cracking and evaporation formulas. ACI Materials Journal. 1998. Vol. 95, No. 4. P. 365–375.

15. ACI 207.1R-96. Mass Concrete. Farmington Hills : American Concrete Institute, 1996. 42 p.

16. Gajda J., VanGeem M. Controlling temperatures in mass concrete. Concrete International. 2002. Vol. 24, No. 1. P. 59–62.

17. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Зі зміною № 1. Київ : Мінрегіон України, 2020. 71 с.

18. ДСТУ Б В.2.7-176:2008. Будівельні матеріали. Суміші бетонні та бетон. Загальні технічні умови (EN 206-1:2000, NEQ). Київ : Мінрегіонбуд України, 2010.

19. EN 206:2013+A2:2021. Concrete – Specification, performance, production and conformity. Brussels : CEN, 2021.

20. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 123 с.

21. Janković K., Romakov Z., Bojović D., Nikolić D. B. Concrete mix design for reconstruction of Northwest breakwater in the Tripoli Harbour – Libya. Tehnički vjesnik. 2011. Vol. 18, No. 1. P. 141–151.

22. Boyke S. P. C., Irmawan M., Navir R. A., Bambang S. A. A. Temperature control on mass concrete in building foundation. International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018. Vol. 9, Issue 6. P. 1649–1659.

23. Prasanthan T., Asamoto S., Nanayakkara S. M. A. Drawbacks of current scale-down mock-up test methodology in mass concrete construction. Advanced & Innovative Concrete Technology : proceedings of the 9th International Conference of Asian Concrete Federation (ACF2020/2021), 26–27 November 2021. Pathum Thani, 2021. 10 p.

24. Choktaweekarn P., Tangtermsirikul S. Effect of aggregate type, casting, thickness and curing condition on restrained strain of mass concrete. Songklanakarin Journal of Science and Technology. 2010. Vol. 32, No. 4. P. 391–402.

25. Schindler A. K., Folliard K. J. Heat of hydration models for cementitious materials. ACI Materials Journal. 2005. Vol. 102, No. 1. P. 24–33.

26. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12 (дата звернення: 02.11.2026).

27. ДБН А.3.2-2-2009 (НПАОП 45.2-7.02-12). Система стандартів безпеки праці. Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2012.

28. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. Київ : МОЗ України, 1999.

29. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Київ : Держнаглядохоронпраці України, 1998.

30. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Київ : МОЗ України, 1999.