

**Міністерство освіти і науки України
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка**

Т. С. Кугаєвська

**КОМБІНОВАНІ СПОСОБИ
ГЕЛІОТЕРМООБРОБКИ БЕТОННИХ ВИРОБІВ**

Монографія

Полтава – 2017

УДК 666.972.035.5:662.997
ББК 38.626.206
К 88

*Рекомендовано до друку вченою радою Полтавського
національного технічного університету імені Юрія Кондратюка
(протокол № 8 від 27.02.2017)*

Рецензенти:

Гоц В.І., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології будівельних конструкцій і виробів Київського національного університету будівництва та архітектури;

Плугін А.А., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту (м. Харків);

Солодкий С.Й., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобільних доріг та мостів Національного університету «Львівська політехніка».

К 88 Кугаєвська Т.С. Комбіновані способи геліотермообробки бетонних виробів: монографія / Т.С. Кугаєвська. – Полтава: ПолтНТУ, 2017. – 308 с.

ISBN 978-966-616-167-6

У монографії відображено методологічні основи геліотермообробки в закритих формах бетонних і залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії або в повітронагрівачі, та теплоти гідратації цементу. Наголошено, що розроблена методологія надає можливість: прогнозувати кінетику набору міцності бетоном виробів (та інші властивості бетону) при твердненні виробів у досліджуваних умовах; визначати ефективні склади бетону; здійснювати техніко-економічне обґрунтування доцільності впровадження комбінованих способів геліотермообробки бетонних і залізобетонних виробів.

**УДК 666.972.035.5:662.997
ББК 38.626.206**

ISBN 978-966-616-167-6

© ПолтНТУ, 2017
© Т.С. Кугаєвська, 2017

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. ЕНЕРГООЩАДНІ СПОСОБИ ПРИСКОРЕННЯ ТВЕРДНЕННЯ БЕТОННИХ І ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ВИРОБІВ.....	10
1.1. Основні енергоощадні способи тепловологісної та теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів.....	10
1.2. Прискорення тверднення бетонних і залізобетонних виробів з мінімізованими витратами теплоносія та без його застосування.....	20
1.2.1. Основні способи прискорення тверднення бетонних і залізобетонних виробів з мінімізованими витратами теплоносія та без його застосування.....	20
1.2.2. Взаємозв'язок кінетики тепловиділення і міцності при твердненні в'язучих речовин та бетонів.....	24
1.2.3. Методи досліджень тепловиділення цементу при гідратації та напрями їх застосування.....	26
1.2.4. Основні фактори, що впливають на інтенсивність теповиділення цементу при гідратації.....	29
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.....	40
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО- РОЗРАХУНКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ КОМБІНОВАНИХ СПОСОБІВ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ БЕТОННИХ ТА ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ВИРОБІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПОВІТРЯ, НАГРІТОГО В КОЛЕКТОРІ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ.....	47
2.1. Комбіновані способи теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії.....	47

2.2. Методика експериментально-розрахункових досліджень теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням нагрітого повітря.....	53
2.3. Методика експериментально-розрахункових досліджень теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу.....	58
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2.....	67
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ БЕТОННИХ ТА ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ВИРОБІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НАГРІТОГО ПОВІТРЯ	69
3.1. Математичні моделі процесів теплообміну в плоских колекторах сонячної енергії	69
3.1.1. Загальні положення.....	69
3.1.2. Теплові баланси світлопрозорого покриття плоского колектора сонячної енергії.....	70
3.1.3. Теплові баланси теплосприймаючої металеві пластини та шару теплоізоляції плоского колектора сонячної енергії... ..	76
3.1.4. Теплові баланси плоского колектора сонячної енергії.....	84
3.1.5. Алгоритм обчислення інтенсивності нагрівання повітря в плоскому колекторі сонячної енергії.....	88
3.2. Математичні моделі процесів теплообміну при тепловій обробці бетонних і залізобетонних виробів нагрітим повітрям.....	94
3.2.1. Теоретичні передумови.....	94
3.2.2. Теплообмін у камері при тепловій обробці бетонних і залізобетонних виробів нагрітим повітрям (перший варіант гідроізоляції виробів).....	102

3.2.3. Теплообмін у камері при тепловій обробці бетонних і залізобетонних виробів нагрітим повітрям (другий та третій варіанти гідроізоляції виробів).....	113
3.2.4. Визначення інтенсивності нагрівання або охолодження конструкцій, що огорожують камеру	122
3.2.5. Визначення коефіцієнтів тепловіддачі	126
3.2.6. Алгоритм обчислення процесів теплообміну в установці для теплової обробки в закритих формах бетонних або залізобетонних виробів із використанням нагрітого повітря.....	131
3.2.7. Аналіз процесів теплообміну в установках для теплової обробки бетонних виробів із використанням нагрітого повітря	142
3.2.8. Теплові баланси камер при термосному твердненні бетонних або залізобетонних виробів після припинення подачі нагрітого повітря.....	160
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3.....	164
РОЗДІЛ 4. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ БЕТОННИХ ТА ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ВИРОБІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТЕПЛОТИ ГІДРАТАЦІЇ ЦЕМЕНТУ.....	167
4.1. Теоретичні передумови.....	167
4.2. Теплові баланси виробничих камер.....	174
4.3. Алгоритм обчислення процесів теплообміну в камері для теплової обробки бетонних або залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу.....	186
4.4. Аналіз інтенсивності тепло- й масообміну між поверхнями тверднучих бетонних та залізобетонних виробів і повітрям камери в початковий проміжок часу.....	193

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4.....	201
РОЗДІЛ 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	202
5.1. Матеріали, що досліджуються, та методи випробування.....	202
5.2. Лабораторні установки для теплової обробки бетонних зразків і виробів.....	203
5.3. Експериментальні дослідження теплової обробки бетонних зразків та виробів із використанням нагрітого повітря.....	211
5.4. Експериментальні дослідження теплової обробки бетонних зразків та виробів із використанням теплоти гідратації цементу...	230
5.5. Експериментальна перевірка математичних моделей.....	248
5.6. Рекомендації щодо технології теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії.....	251
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 5.....	254
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	257
ЛІТЕРАТУРА.....	259
ДОДАТОК А. Розрахункові схеми лабораторних камер для визначення тепловиділення цементу при гідратації	302
ДОДАТОК Б. Розрахункові схеми плоских колекторів сонячної енергії	304
ДОДАТОК В. Розрахункові схеми теплових камер.....	306

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·°С);

ε – ступінь чорноти;

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·°С);

ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості, м²/с;

ρ – густина, кг/м³;

$\tau, \Delta\tau$ – проміжок часу, с;

ω – швидкість руху повітря, м/с;

a – коефіцієнт температуропровідності, м²/с ;

c – питома масова теплоємність, Дж/(кг·°С);

c_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, Вт/(м²·К⁴);

F – площа поверхні теплообміну, м²;

L – витрата повітря, м³/с;

m – маса, кг;

Q – кількість теплоти, Дж;

q – густина теплового потоку, Вт/м²;

t – температура, °С;

T – абсолютна температура, К;

Bi – критерій Біо;

Fo – критерій Фур'є;

Gr – критерій Грасгофа;

Nu – критерій Нуссельта;

Pr – критерій Прандтля;

Re – критерій Рейнольдса.

ВСТУП

Тепловологісна та теплова обробка бетонних і залізобетонних виробів та конструкцій є найбільш енергомістким процесом в технології їх виготовлення.

Наприклад, у ДБН А.3.1-8-96 зазначено, що для техніко-економічних розрахунків усереднені питомі витрати пари для теплової обробки виробів у ямних камерах приймають такими, які дорівнюють 170 кг/м^3 (при вказаній у нормах вимозі до значення $R, \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$, для конструкцій, що огороджують камери). «Усереднену витрату електроенергії на електротеплообробку приймають для виробів з важкого і легкого конструкційного бетону не більше 80 кВт-ч/м^3 » [46]. Слід підкреслити, що для конкретних умов виробництва ці показники уточнюються.

Геліотермообробка бетонних і залізобетонних виробів надає можливість зменшити енергетичні витрати в процесі прискорення їх тверднення. Але більшість відповідних способів призначено для впровадження в умовах спекотного клімату.

Клімат центральних районів України не є сприятливим для використання геліоформ. Так, згідно з ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 середня за червень сонячна радіація (що надходить на горизонтальну поверхню) для міста Полтава дорівнює:

- за ясного неба: пряма 654 МДж/м^2 , розсіяна 212 МДж/м^2 ;
- за середніх умов хмарності: пряма 342 МДж/м^2 , розсіяна 287 МДж/м^2 [50].

Для порівняння: у ДБН А.3.1-8-96 рекомендовано при попередніх розрахунках приймати питому тепломісткість насиченої водяної пари 2680 кДж/кг (для кожного підприємства цей показник уточнюється); відповідно в попередніх розрахунках тепломісткість 170 кг насиченої водяної пари дорівнює $455,6 \text{ МДж}$ (для кожного підприємства цей показник уточнюється).

Потрібно розробити способи застосування сонячної енергії для теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів, упровадження яких можливе не тільки в умовах спекотного клімату: комбіновані способи теплової обробки цих

виробів у закритих формах із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії або в повітронагрівачі, та теплоти гідратації цементу.

Необхідно розробити методологічні основи теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням низькопотенціальних джерел теплоти.

Кугаєвська Тетяна Сергіївна висловлює щирю вдячність за консультації доктору технічних наук, професорові, завідувачу кафедри фізико-хімічної механіки та технології будівельних матеріалів і виробів Харківського національного університету будівництва та архітектури Сопову Вікторові Петровичу.

РОЗДІЛ 1
ЕНЕРГООЩАДНІ СПОСОБИ
ПРИСКОРЕННЯ ТВЕРДНЕННЯ
БЕТОННИХ І ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ВИРОБІВ

1.1. Основні енергоощадні способи
тепловологісної та теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів

При тепловологісній та тепловій обробці бетонних і залізобетонних виробів та конструкцій у них створюється неоднорідність полів температури, вологовмісту й тиску, що може спричинити в бетоні необоротні структурні зміни. Для зменшення цих деструктивних процесів застосовуються різні температурні режими тепловологісної та теплової обробки вказаних виробів, серед яких – низка ступінчастих і термосні [13, 15, 18, 31, 81, 148, 152, 155, 158, 159, 178, 201, 209 – 211, 229, 251, 258, 261, 264, 291, 300, 303 та ін.].

Сумісно з дослідженням способів поліпшення якості бетонних і залізобетонних виробів вивчаються та впроваджуються у виробництво напрями зменшення енерговитрат при їх виготовленні. У ДБН А.3.1-7-96 підкреслено, що раціональна витрата теплової енергії «забезпечується застосуванням сучасних малоенергоємних способів ТО, удосконаленням конструкцій теплових агрегатів, вибором режимів ТО на основі системного підходу до процесу виробництва виробів, використанням хімічних добавок – прискорювачів тверднення, швидкотверднучих в'язучих, а також застосуванням засобів автоматичного керування ТО» [45].

Наприклад, Ізотовим В.С. та Соколовою Ю.А. зазначено, що при використанні прискорювачів тверднення бетону (хлориду кальцію, хлорид-нітрат-нітриту кальцію, хлориду алюмінію, сульфату натрію та деяких інших) наявна можливість на 20% зменшити витрату теплової енергії [75]. Уласевич В.П. разом з іншими дослідниками зазначає, що застосування комплексної хімічної добавки STG-3 при тепловій обробці залізобетонних

конструкцій надає можливість знизити температуру ізотермічного витримування з 80 до 60°C [269]. Можливість зменшення енерговитрат при тепловологісній та тепловій обробці бетонних і залізобетонних виробів із використанням відповідних хімічних добавок показано також у роботах [14, 80 та ін.].

Атоянном В.Р., Малим І.Н., Об'єщенко Г.А., Трембицьким С.М. та іншими дослідниками проаналізовано економічну ефективність застосування розігрітої бетонної суміші з наступним термосним витримуванням [9, 175, 176, 265, 266].

Рекомендації стосовно поліпшення теплозахисних властивостей конструкцій, котрі огороджують теплові камери, відображено в джерелах [16, 22, 46, 262 та ін.].

У статті [310] Корнєєв А.Д. та інші дослідники наголошують, що спосіб теплової обробки бетонних виробів із використанням продуктів згоряння газу призводить до зменшення витрат теплової енергії у 2 – 3 рази порівняно з традиційними режимами, в яких теплоносій – пара [310]. Разом з тим при застосуванні цього способу можливе пересушування виробів, що негативно впливає на міцність бетонів [214, 310]. Потрібно передбачати або захист бетону від випаровувань вологи шляхом нанесення різних плівкоутворюючих, вологонепроникних і гідрофобізуючих речовин, або зволоження середовища в тепловому агрегаті, або рециркуляцію теплоносія [33, 46, 89, 200, 202, 205, 225, 298]. Слід підкреслити, що проблема пересушування поверхневих шарів бетонних і залізобетонних виробів виникає також при використанні деяких інших теплоносіїв (наприклад, ТЕНів (трубчастих електронагрівачів)).

Дослідниками Колісник О.П. та Коц І.В. спільно з іншими дослідниками у патентах [191, 192, 197] та в статтях [49, 83 – 88, 90] відображено спосіб теплової обробки бетонних виробів у тепловій камері з аеродинамічним нагрівачем роторного типу. Пароповітряна суміш утворюється в робочому просторі камери в результаті додавання до нагрітого повітря розпилених крапель води.

Напрацювання в напрямі оптимізації тепловологісної та теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів наведено також у роботах [26, 38, 48, 73, 91, 93, 134, 136, 165, 190, 217, 226, 231, 245 – 248, 254, 312, 320, 325, 326, 342, 345, та ін.].

У районах зі спекотним кліматом упроваджено геліотермообробку бетонних і залізобетонних виробів. Одним із розповсюджених способів використання сонячної енергії для прискорення тверднення цих виробів є їх нагрівання під світлопрозорим покриттям, яке може бути виконано з силікатного скла, полімерних плівок, склопластиків, оргскла [68, 70, 71, 218, 220, 221, 223, 243 та ін.].

У патентах [203, 204] Григорян В.І. та інші дослідники відображають геліоустановки для термообробки бетонних і залізобетонних виробів із використанням світлопрозорого покриття. У патенті [204] зазначено, що впродовж сонячного дня в геліоустановці температура підвищується до 50 – 90°C. У вечірні та нічні години розігріті днище, стінка і причілкові сторони теплоакumuлюючої ємкості підтримують підвищену температуру у виробках [204]. Особливості способів прискорення тверднення бетонних і залізобетонних виробів у сонячному колекторі показано, зокрема, в патенті [207] (автори – Кузнєцова Л.В., Полосін І.І. та Щукіна Т.В.), а також у статтях [307, 308].

У рекомендаціях [234] підкреслено, що геліотермообробка бетонних виробів із використанням світлопрозорих теплоізолюючих покриттів (СВІТАП) здійснюється впродовж 20 – 22 год. За цей час міцність бетону виробів, виготовлених на цементі марки 400, орієнтовно складає: для бетону марки М 200: 45 – 55% R_{28} ; М 300: 55 – 65% R_{28} ; М 400: 65 – 70% R_{28} . Заседателевим І.Б., Малінським Є.Н. та Темкіним Є.С. у книзі [68] зазначено, що в добовому віці кубикова міцність геліотермооброблених зразків залежно від В/Ц становить 40 – 60% $R_{28}^{Н.Т.}$. У віці одного місяця кубикова міцність бетону, який твердне під СВІТАП, як правило, мало відрізняється від міцності бетону нормального тверднення. Прогрівання радіаційним потоком у геліоформах під СВІТАП бетонних зразків і виробів товщиною до 300 – 400 мм

здійснюється при м'яких режимах, а саме: швидкість підйому температури бетону складає 5 – 7°C/год; тривалість ізотермічного витримування при максимальній температурі 60 – 70°C відбувається впродовж 5 – 7 год; охолодження до температури 35 – 50°C здійснюється зі швидкістю 1,5 – 2,5°C/год (залежно від масивності виробів, марки бетону, температури навколишнього середовища і т.ін.). Структура і властивості цих бетонів кращі, ніж у пропарених за традиційними режимами, і наближаються до бетонів нормального тверднення [68, 69]. Високу якість бетонних виробів, теплова обробка яких здійснювалася вказаним способом, зазначено. Якубовим В.А та Прієвим А.М. у статті [313].

У статті [220] Подгорнов М.І. із співавторами аналізують експериментальні дані, отримані різними дослідниками й дослідницькими установами стосовно вибору кількості прозорих покриттів у колекторі сонячної енергії. У статті зазначено, що теоретичні та експериментальні дослідження підтвердили висновки про ефективність одношарового прозорого покриття при експлуатації низькопотенціальних колекторів нагрівання води й опалубних форм для термообробки бетону. Збільшення кількості прозорих покриттів до двох і трьох (з утворенням між ними повітряного зазору) зменшує відведення теплоти з поверхні теплоприймача, але одночасно підвищує оптичні втрати при проходженні променевої енергії на теплосприймаючу поверхню. У статті [304] Шифріним С.А. відмічено, що застосування двошарового покриття СВІТАП порівняно з одношаровим покриттям у 1,5 разу зменшує інтенсивність втрат бетоном вологи (бетон класу В15, товщина виробу 0,15 см), і, як наслідок, у 1,7 разу зменшується швидкість охолодження виробів. У статті [302] подано теоретичні рекомендації щодо застосування скла в геліоколекторах. Властивості скла наведено, зокрема, в джерелах [21, 72, 259, 301]. Інтенсивність надходження сонячної радіації до поверхонь відображено в джерелах [32, 50 та ін.].

Процес теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів відбувається в умовах безперервного споживання теплоносія, а надходження сонячної енергії

має нестационарний характер. Це протиріччя можна вирішити або шляхом створення комбінованих енергетичних систем, у яких застосовуються сонячна енергія і традиційні теплоносії, або короткочасним добовим акумулюванням променевої енергії в різних речовинах [94, 174, 218, 220, 221, 224].

Спосіб комбінованої геліотермообробки залізобетонних виробів, за якого до поверхні виробів надходить сонячна енергія через покриття СВІТАП, а до піддону форм підводиться теплота від традиційних джерел енергії, відображено Заседателевим І.Б. із співавторами у книзі [68] та Малінським Є.Н. і Орозбековим М.О. у статті [149]. При цьому способі геліотермообробки бетонних виробів міцність бетону при стиску у віці одного місяця дещо вища, ніж у пропареного, і незначно відрізняється від відповідних показників бетонів нормального тверднення [68]. У статті [95] Криловим Б.А. та Аруовою Л.Б. наголошено, що всі бетони, прискорення тверднення яких відбувалося за допомогою комбінованого способу геліотермообробки, мають міцність при стиску і розтягу вищу, ніж міцність пропарених бетонів. Це можна пояснити сприятливими режимами прогрівання при більш низьких температурах [95].

У статті [94] Криловим Б.А. та Масловим В.П. підкреслено, що електрична енергія є найбільш ефективним і універсальним дублюючим джерелом теплоти при комбінованому способі геліотермообробки бетонних виробів. У патенті [187] та статті [8] Даужановим Н.Т. і Аруовою Л.Б. відображено спосіб комбінованої теплової обробки у світлопрозорих камерах будівельних виробів із полістиролбетонної суміші. У зимовий та в хмарний періоди року передбачено нагрівання виробів з нижньої та верхньої сторін ТЕНами. Низку способів комбінованої геліотермообробки бетонних та залізобетонних виробів і конструкцій відображено, зокрема, в джерелах [40, 42, 43, 64, 65, 82, 168, 188, 189, 212, 253, 255, 282, 318, 346].

Аруова Л.Б., Даужанов Н.Т., Заседателев І.Б., Мазманян П.В., Подгорнов М.І. та інші дослідники вивчали особливості геліотермообробки з проміжним теплоносієм в умовах закритих цехів (із застосуванням дублюючого джерела теплоти) [7, 41, 70, 186, 218, 221 та ін.].

Дослідником Подгорновим М.І. у роботі [218] та дослідником Nadiradze A. в роботі [338] відображено принцип дії установок для теплової обробки бетонних виробів, в яких використовується нагріте в колекторі сонячної енергії повітря. Подгорновим М.І. зазначено: якщо основним джерелом теплоти при тепловій обробці бетонних виробів є традиційні теплоносії, то додатковим – сонячна енергія. У денний час у теплосприймаючому пристрої нагрівається теплоносієм (повітря або вода) і подається до теплових агрегатів або до акумулятора теплоти, розташованого під камерою. Теплова обробка може здійснюватися і в закритих цехах, і на літніх полігонах [218]. До складу установки, запропонованої Nadiradze A., входять, зокрема: геліокамера (в якій під світлопрозорим покриттям тверднуть бетонні вироби); колектор сонячної енергії, в котрому нагрівається повітря; вентилятори; обладнання для відведення конденсату та ін. [338]. Основний недолік указаних способів: нагріте повітря, що надходить до камери, спричинює випаровування вологи з поверхні виробів, що недопустимо.

Дослідниками Коц І.В., Дудар І.Н. та Колісник О.П. запропоновано в сприятливі погодні умови нагрівати в сонячному колекторі воду і використовувати її в установці з аеродинамічним нагрівачем роторного типу [193]. Призначення цієї установки – здійснення теплової обробки бетонних виробів нагрітим зволженим повітрям.

Заседателевим І.Б., Мазманяном П.В. у статті [70] та Малінським Є.Н. і Орозбековим М.О. у статті [149] показана можливість застосування сонячної енергії для теплової обробки бетонних виробів у ямних камерах, де теплоносієм є гаряча аерована вода. У статті [6] відображено принципові схеми геліокамер бульбашкового типу з дублюючим джерелом теплоти. У статті [268] Ш.Е. Турдалієвим наведено принцип дії лабораторної геліогідроциркуляційної камери багатоярусного завантаження. У статті [180] Осадчим Г.Б. показано спосіб прискорення тверднення ніздрюватих бетонів у геліокамері, розташованій в сонячному соляному ставку. У патенті [195] авторами запропоновано для теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів

використовувати воду, нагріту в колекторі сонячної енергії (вода в камері рухається в трубах), а за необхідності застосовувати додаткове джерело теплоти – водонагрівач. У холодний період року водонагрівач – єдине джерело теплоти.

У статті [309] Таймасхановим Х.Е. та іншими дослідниками зазначено, що економічний ефект від упровадження в умовах сухого спекотного клімату геліотермообробки залізобетонних виробів (застосовується покриття СВІТАП) становить за розрахунками 25 – 30%. Цей показник обумовлюється зниженням кількості цементу (бетони – на комплексних в'язучих з наповнювачем із золошлакових сумішей) та відмови від здійснення тепловологісної обробки виробів у теплий період року. У холодний період року прискорення тверднення виробів відбувається в пропарювальних камерах [309]. Аumenov Zh. у статті [315] перелічує переваги використання сонячної енергії для прискорення тверднення бетонних виробів.

Методики проведення лабораторних досліджень геліотермообробки бетонних виробів показано в статтях [219, 293].

З метою оптимізації тепловологісної та теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів та впровадження нових способів теплової обробки здійснюється математичне моделювання відповідних процесів тепло- і масообміну [2, 3, 12, 20, 72, 152 – 154, 164, 244, 283, 303 та ін.] .

Мар'ямовим Ю.Б. у книзі [152] наведено методики обчислення розподілу температури в бетонних і залізобетонних виробках під час їх теплової обробки. Запропоновано виконувати відповідні обчислення: стосовно плит та панелей – як для необмежених пластин; стосовно виробів, у яких три виміри близькі між собою, – як для шарів; стосовно балок, колон (і т.ін.) – як для нескінченних циліндрів [152]. Александровський С.В., Федосов С.В., Шестаков Н.І. та інші дослідники при математичному моделюванні процесів тепловологісної обробки плит та панелей також використовують відповідне спрощення [2, 3, 164, 283, 303].

Ликовим О.В. у роботах [143, 144] показано аналітичне розв'язання задач стосовно визначення розподілу температури по товщині необмеженої пластини, необмеженого циліндра і шару за наявності внутрішнього джерела теплоти за умови, що джерело теплоти діє безперервно та його потужність з часом не змінюється, а також за іншої умови – теплова потужність джерела є заданою функцією часу. Александровським С.В. запропоновано власний метод розв'язання задач теорії теплопровідності за наявності внутрішніх джерел теплоти, інтенсивність яких залежить від температури [3]. Заседателевим І.Б. та Петровим-Денисовим В.Г. у роботі [72] наведено низку послідовних математичних перетворень, наслідком котрих є спрощення диференціального рівняння теплопровідності з внутрішнім джерелом теплоти.

Федосов С.В. та інші дослідники в статті [164] відображають методику моделювання процесу тверднення бетону, яка може бути використана за умови фіксованого значення температури бетону. Разом з тим при тепловій обробці бетонних і залізобетонних виробів їх температура змінюється в широких межах за певним графіком [164]. Федосовим С.В. спільно зі співавторами в статті [285] показано моделювання теплових процесів при монолітному бетонуванні. Зазначено, що наведена модель може бути застосована для інших технологій, наприклад, для тепловологісної обробки бетонних виробів [285]. Напрацювання в цьому напрямі Федосова С.В. разом з іншими дослідниками наведено також в статтях [80, 81, 172, 284, 286].

Колісник О.П. і Коц І.В. разом з іншими дослідниками аналізують енергетичні та матеріальні баланси процесів тепловологісної обробки бетонних виробів із застосуванням аеродинамічного нагрівача роторного типу [49, 83 – 85, 87, 89, 90].

Ликовим О.В. у роботах [141, 144 – 147] та в роботах [142, 143], спільних з Михайловим Ю.А., проаналізовано процеси тепло- і масообміну в системах, до яких входять, зокрема, капілярно-пористі тіла. У книзі [147] відображено ці процеси також і стосовно колоїдних та капілярно-пористих колоїдних тіл.

Фокінім В.М. й іншими дослідниками в роботі [287] показано принцип розрахунку температурного поля методом ітерацій.

У джерелі [239] наведено методику визначення параметрів повітряного прогрівання монолітних тонкостінних конструкцій ($M_n > 10$), в якій подано відповідні теплові баланси.

Серед складових теплових балансів установок для тепловологісної та теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів – витрати теплоти на нагрівання конструкцій, що огорожують теплові установки, та втрати теплоти крізь них. Мар'ямовим Н.Б. запропоновано використовувати емпіричні формули для обчислення кількості теплоти, акумульованої стінками (одношаровими), підлогою та кришкою ямної пропарювальної камери [152]. У джерелах [22, 134, 152] відображено формули для обчислення втрат теплоти крізь конструкції, що огорожують теплові камери, а в довіднику [22] подано загальну формулу для обчислення витрат теплоти на нагрівання огорожувальних конструкцій теплової камери періодичної дії за цикл її праці. У поясненнях до цих формул не вказано, як визначати зміну температурного поля в указаних конструкціях.

Методику обчислення показника тривалості охолодження блока камер з виробами відображено в нормах [226, 262]. Цей показник запропоновано визначати з використанням коефіцієнтів теплопередачі конструкцій, котрі огорожують камеру. Слід підкреслити, що в залежностях, які характеризують процеси охолодження (або нагрівання) тіл різної форми (в цьому випадку – конструкцій, що огорожують камери) коефіцієнт теплопередачі не використовується. Натомість використовуються відповідні коефіцієнти, критерії, формули, які наведено, зокрема, в джерелах [3, 35, 77, 133, 135, 141 – 144, 146, 147, 152, 162, 259, 288, 292, 311].

У низці робіт відображено математичне моделювання процесів теплової обробки бетонних виробів у геліоформах. Так, Заседателевим І.Б. разом із співавторами у книзі [68] наведено складові теплових балансів геліоформи та установки для комбінованої геліотермообробки бетонного

виробу (із застосуванням СВІТАП і додаткового джерела теплоти). Основні призначення вказаних теплових балансів – визначення тривалості сезону експлуатації геліополігонів та кількості необхідної додаткової енергії при цілорічному застосуванні цього способу теплової обробки бетонних виробів. У статті [222] Подгорновим М.І., Коротєєвим Д.Д. та в статті [308] Щукіною Т.В. відображено математичне моделювання процесів теплової обробки бетонних виробів у геліоформах.

У книгах [44, 319] Duffie J.A. докладно проаналізовано процеси теплообміну в плоскому колекторі сонячної енергії типу «лист – труба» та наведено теплові баланси для інших видів колекторів. Серед цих балансів – тепловий баланс плоского колектора сонячної енергії, в якому нагрівається повітря. Указані теплові баланси складено за умови, що режим роботи колекторів – стаціонарний. Разом з тим температурний режим плоского колектора сонячної енергії, в якому нагрівається повітря для теплової обробки бетонних виробів (патенти [194, 199]) – нестаціонарний, що обумовлює особливості відповідних обчислень.

У статті [220] Подгорновим М.І. та співавторами подано рівняння теплового балансу колектора сонячної енергії для загального випадку. У довіднику [32] та в книзі [289] наведено формулу для визначення теплопродуктивності певних типів колекторів сонячної енергії. У статті [66] Желих В.М. та інші дослідники відображають загальний ексергетичний аналіз плоского колектора сонячної енергії й експериментальні дослідження. У статтях [215, 216] Плешка М.С. та Вирлан П.М. наводять результати експериментальних досліджень сонячного повітряного колектора. У статті [4] Алмаєвим А.Ю. та Лушкіним І.О. проаналізовано переваги та недоліки плоских і вакуумних колекторів сонячної енергії. Результати досліджень колекторів сонячної енергії та напрями їх застосування відображено також у статтях [314, 316, 322, 340, 344, 348].

1.2. Прискорення тверднення бетонних і залізобетонних виробів з мінімізованими витратами теплоносія та без його застосування

1.2.1. Основні способи прискорення тверднення бетонних і залізобетонних виробів з мінімізованими витратами теплоносія та без його застосування

У патенті [198] Плугінім А.А. із співавторами відображено особливості підбору складу та виготовлення особливошвидкотверднучого безпропарювального бетону, який може бути найефективніше використаний при виробництві залізобетонних шпал. До складу бетону входять в оптимальній кількості щебінь, пісок, цемент, вода, добавка-суперпластифікатор С-3 (або її аналог) і добавка-електроліт CaCl_2 . Після формування бетонні вироби витримують у камері пропарювання без подачі пари при температурі, не нижчій ніж 30°C , або влітку при такій же температурі на відкритому майданчику протягом 12 – 18 год.

У статті [23] Борисовим А.А. із співавторами зазначено, що для прискорення набору міцності цементів $\square\square$ та $\square\square\square$ класів доцільно здійснювати їх низькотемпературну теплову обробку з нагріванням по піковому режиму до температури $30 - 35^\circ\text{C}$, з наступним твердненням за рахунок акумульованої теплоти.

У статті [236] Романенко О.В., Плугінім А.А. і Яковлевим В.О. наведено результати досліджень оптимального вмісту суперпластифікатора для отримання потрібної передаточної міцності залізобетонних шпал при їх виробництві без тепловологісної обробки. У статті [235] Романенко О.В. показано результати визначення основних характеристик матеріалів, які застосовують для виробництва залізобетонних шпал і обґрунтовано вибір тих матеріалів, котрі найбільше сприятимуть застосуванню оптимальних складів бетону, які, зокрема, дозволять знизити температуру та тривалість ТВО або відмовитися від ТВО.

У джерелі [262] вказано, що для енергозберігаючих режимів теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів та для безпрогрівних технологій їх виробництва доцільно застосовувати бездобавочний портландцемент 1-ї та 2-ї груп за ефективністю пропарювання, який містить у клінкері більше, ніж 58% трикальцієвого силікату та 5 – 9% трикальцієвого алюмінату. Крім того, питома поверхня цементу повинна бути не меншою, ніж $290 \text{ м}^2/\text{кг}$, а активність цементу у віці 1 та 2 діб повинна бути не меншою, ніж 12 і 20 МПа (відповідно).

У статті [237] Руденко М.М. із співавторами показана можливість отримання бетонних виробів з проектними експлуатаційними властивостями без застосування теплової обробки.

Петровою Т.М. спільно з іншими дослідниками проаналізовано принципи вибору комплексних добавок для безпропарювальної та малопрогрівної технологій виробництва бетонних і залізобетонних виробів [157, 213, 230]. Виділено три основні групи факторів, які визначають набір бетоном високої ранньої міцності: використання комплексних добавок поліфункціональної дії; цілеспрямований вибір цементу і врахування його сумісності з добавками; оптимальна температура тверднення. У статті [230] підкреслено, що комплексна добавка «Петролафс» (патент [206]) призначена для впровадження безпрогрівних і малопрогрівних технологій виробництва бетону.

У джерелах [75, 92] зазначено, що такі добавки, як хлорид кальцію, хлорид-нітрат-нітрит кальцію, хлорид алюмінію, сульфат натрію при природному твердненні бетону (при позитивній температурі) збільшують швидкість набору ним міцності в 3 – 4 рази, що дозволяє через 24 години після закінчення формування отримати бетон з 50 – 60% відпускнуої міцності.

У статті [139] Ложкіним В.П. із співавторами наведено результати лабораторних досліджень ефективності дії хімічних добавок: Хідетал-П-5 (суперпластифікатор – прискорювач – інгібітор), Універсал-П-2 (прискорювач – пластифікатор – інгібітор), ТСМ+СН (пластифікатор – прискорювач – інгібітор) та С-3+ННХК (суперпластифікатор – прискорювач). У таблиці 1.1 відображено

міцність при стиску бетонів, котрі тверділи в нормальних умовах упродовж 24 та 36 год. Важкий бетон з добавками Хідетал-П-5, С-3+ННХК та Універсал-П-2 через 36 год нормального тверднення досягають 70% міцності від класу, а при застосуванні добавки ТСМ + СН можна виготовляти вироби без теплової обробки при температурах від +10°C; ефективність дії добавки ТСМ+СН залежить від рухливості бетонної суміші та температури тверднення [139].

Таблиця 1.1

Міцність бетонів з комплексними добавками
при нормальному твердненні [139]

Добавка	Клас бетону за міцністю						
	В7,5	В10	В15	В25	В30	В35	В40
ТСМ + СН	95/118	93/110	95/115	92/108	95/100	90/105	95/95
Хідетал- П-5	70/83	72/85	68/80	65/80	63/75	66/70	64/70
Універсал- П-2	50/70	45/68	49/65	51/73	55/76	52/74	54/75
С-3 + ННХК	62/71	62/75	59/70	60/69	58/71	57/73	59/72
Без добавок	30/43	32/40	35/44	31/45	36/44	30/41	31/42

Примітка. Перед рискою показано міцність бетону при стиску у відсотках від класу через 24 год, а за рискою – через 36 год [139].

У статтях [169, 170] Недуєвим Ю.М. із співавторами показано вибір типу комплексної добавки та дослідження мінеральної затравки (у якості останньої може бути застосовано заздалегідь гідратований портландцемент) для прискорення тверднення бетону в початковий період без використання теплоносія.

У джерелі [262] наведено методику розрахунку раціональних режимів безпрогрівного витримування бетонних та залізобетонних виробів.

При тепловій обробці бетонних і залізобетонних виробів із використанням тільки теплоти гідратації цементу набуває суттєвого значення встановлення мінімально можливої міцності бетону після розпалублення виробів. У ДБН А.3.1-7-96 в пункті 8.1.1 вказано, що розпалублення виробів «слід провадити після досягнення бетоном розпалубної міцності, яка становить не менше 50% від проектного класу (марки) з міцності на стиск» [45]. Також у ДБН А.3.1-7-96 в пункті 7.3.8 зазначено: «Двостадійну ТО виробів з набуттям на першій стадії попередньої розпалубної міцності 40 – 50% проектною, на другій стадії – відпускної або передаточної міцності) в залежності від прийнятої технології провадять в агрегатах будь-яких типів за режимами, що встановлені дослідним шляхом» [45]. У джерелах [226, 262] вказано, що значення розпалубної міцності встановлюється підприємством-виробником технологічними правилами виробництва для кожного виду виробу. При цьому повинні бути забезпечені відповідні температурно-вологісні умови для досягнення при наступному складуванні та зберіганні відпускної міцності в установлені терміни.

1.2.2. Взаємозв'язок кінетики тепловиділення і міцності при твердненні в'язучих речовин та бетонів

Показники тепловиділення дозволяють оцінити швидкість термохімічних властивостей в'язучого й кінетику процесу гідратації [166].

Наприклад, у книзі Ушєрова-Маршака О.В. [271] наведено результати експериментального визначення взаємозв'язку між кінетикою тепловиділення та зростанням міцності зразків бетону для в'язучих з модулем основності в інтервалі 3,16 – 1,34. Установлено зворотний зв'язок між показником основності в'язучого і міцністю бетону, та прямий зв'язок – з тепловиділенням при гідратації.

Нєсвєтаєвим Г.В. і Та Ван Фан у статті [171] обґрунтовано взаємозв'язок між величиною тепловиділення цементного тіста в процесі тверднення і кінетикою набору міцності. У статті [341] дослідник Dale P. Bentz із співавторами відображають вплив залежності границі міцності при стиску від сукупного тепловиділення цементу при твердненні.

Кондо Р. і Даймоном М. запропоновано термін початкового тверднення цементного тіста розділити за інтенсивністю тепловиділення на чотири періоди.

Перший період взаємодії цементу з водою триває 30...40 хв і характеризується значним виділенням теплоти в цементному тісті (особливо впродовж перших 5...8 хв) з наступним зменшенням цього показника [29]. Під час першої стадії структуроутворення відбувається коагуляція колоїдних часток і утворення наприкінці цієї стадії просторового каркаса коагуляційної структури [10, 299]. У початковий період (до 1 год) частка цементу, що вступає в реакції гідратації, не перевищує 1% [27]. Штакельберг Д.І. зі співавторами у статті [305] підкреслюють, що на початкових етапах структуроутворення фізична волога водно-силікатних систем є повноправною структурною складовою, що з'єднує твердофазові елементи.

Другий (індукційний) період – це період неінтенсивного тепловиділення, який відбувається впродовж 2...4 год від початку взаємодії цементу з водою.

Наявність цього періоду обумовлена утворенням на клінкерних частках гелевих оболонок гідратних з'єднань, унаслідок чого майже припиняються надходження води до внутрішніх зон зерен в'язучого [29]. У книзі [299] наголошено, що друга стадія структуроутворення системи – розвиток просторової коагуляційної структури.

Третій період починається через 3...5 годин після початку взаємодії цементу з водою. Цей період характеризується початком тужавлення та поступовим збільшенням тепловиділення, яке досягає максимуму через 6 – 10 годин (коли за звичай має місце кінець тужавіння цементу) [29]. Під час третьої стадії структуроутворення коагуляційні контакти перетворюються в кристалізаційні, при цьому значно підвищується ступінь гідратації. Під час цієї стадії можуть виникати деструктивні явища в результаті виникнення внутрішніх напруг в кристалізаційній структурі [299].

Четвертий період відбувається після переходу показника тепловиділення через максимум. Характеризується цей період зменшенням кількості теплоти, що виділяється наприкінці добового строку, до 4,19 Дж/год на 1 г цементу. Під час четвертого періоду спостерігається найбільш інтенсивне зростання міцності системи, а тепловиділення у звичайних цементах становить 15...20% загального [29]. У цих умовах зростання міцності відбувається в основному за рахунок субмікросталічної структури (яка повільно розвивається) гідросилікатних мінералів [299].

1.2.3. Методи досліджень тепловиділення цементу при гідратації та напрями їх застосування

Калориметрія вивчає сукупність методів і засобів вимірювання кількості теплоти й теплових ефектів, які супроводжують процеси взаємодії в хімічних системах. Вибір типу калориметра здійснюється з урахуванням мети експерименту, тривалості процесу, величини теплового ефекту, температури, тиску, фізико-хімічних особливостей реагентів і необхідної точності вимірювання [166].

У ДСТУ Б В.2.7-225:2009 відображено особливості адіабатичного методу визначення тепловиділення при твердненні бетону. «Метод слід застосовувати при зведенні масивних споруд, які вимагають вживання в конкретних умовах спеціальних заходів щодо регулювання температурних напружень, що виникають внаслідок тепловиділення бетону при твердненні» [60].

Використання показників тепловиділення бетону (отриманих за допомогою адіабатичного калориметра) відображено, наприклад, Руновою Р.Ф. і Троян В.В. у роботі [241] та Троян В.В. у роботі [267].

При аналізі термонапруженого стану фундаментної плити для моделювання тепловиділення в бетоні Руновою Р.Ф. і Троян В.В. у джерелі [241] використовувалася формула (загальний вигляд якої наведено також у книзі [67] Запорожцем І.Д. із співавторами)

$$Q(\tau) = Q_{28} \left(1 - e^{-k_Q \cdot \tau^{n_Q}} \right), \quad (1.1)$$

де Q_{28} – інтегральне (сумарне) тепловиділення бетону за період 28 діб (це значення отримане на основі експериментальних даних, визначених в адіабатичному калориметрі);

k_Q , n_Q – безрозмірні коефіцієнти, які визначаються за методом Монте-Карло; τ – час.

У статті [150] Мальцевим В.Н. із співавторами показано результати дослідження кінетики тепловиділення в'язучих при їх твердненні в адіабатичному режимі. Ці дані використовуються для аналізу сутності відповідних фізичних і хімічних процесів.

Для визначення теплоти гідратації цементу застосовуються також ізотермічні калориметри, перевага яких полягає в тому, що гідратація речовин, котрі досліджуються, відбувається при сталій температурі, а величина, котра фіксується, – швидкість екзотермії [277]. Принцип дії різних видів ізотермічних калориметрів показано, наприклад, у джерелах [37, 138, 166, 227, 275].

Значення калориметрії в оцінюванні сумісності системи цемент – добавка відобразили, у низці робіт, серед яких – роботи [1, 25, 256, 270, 272, 278, 281, 294 – 297].

Ушеровим-Маршаком О.В. разом з іншими дослідниками в статтях [156, 273, 274] показано основні принципи методу температурно-часового моніторингу впливу добавок на тверднення цементу (на ранній стадії), що надає змогу оцінювати сумісність цементів і добавок та прогнозувати ефективність останніх.

У статті [179] Балатханова Е.М. із співавторами відображають результати досліджень тепловиділення цементних систем, модифікованих дрібнодисперсним наповнювачем, отримані з використанням ізотермічного калориметра. Аналіз результатів експериментів дозволив авторам визначити оптимальні склади цементних композитів, наповнених порошками кварцу, пісковику, вапняку.

У статті [250] Ушеровим-Маршаком О.В. із співавторами підкреслено, що разом з ізотермічними калориметрами типу Кав'є все частіше використовуються калориметри з нестационарною оболонкою (термосні калориметри порівняння). Принцип дії калориметрів полягає у вимірюванні й порівнянні температури тверднучих зразків із цементу, розчину чи бетону. Для компенсації коливань температури навколишнього середовища використовується диференціальна схема: в одній з калориметричних комірок

розміщується зразок, теплоємність якого є наближеною до теплоємності дослідного зразка; програмно визначається різниця температур зразків, за допомогою котрої обчислюється тепловий ефект. Такі калориметри у більшості випадків використовують для порівняння різних виробничих добавок, визначення сумісності цементів і добавок тощо [250]. У статті [74] Ізотовим В.С. та Ібрагімовим Р.А. указано, що для визначення тепловиділення цементів, до складу яких входили досліджувані види гіперпластифікаторів, було застосовано термосний метод із використанням вимірювального комплексу «ТЕРМОХРОН DS1921».

Експериментальні дослідження тепловиділення різних хімічних добавок у складі цементних паст із застосуванням термосної калориметрії наведено Васильєвим А.С. і Барабаншиковим Ю.Г. у статті [28].

Бабицьким В.В. та Бібіком М.С. із співавторами відображено особливості методики дослідження зміни температури тверднучого цементного тіста в теплоізолюваному устаткуванні. Результати експериментально-розрахункових досліджень призначено, зокрема, для оптимізації періоду попереднього витримування бетонних і залізобетонних виробів [11, 17, 18, 20]. У патенті [208] та в статті [140] Лотовим В.А. із співавторами відображено принцип дії диференціального мікрокалориметра, за допомогою якого визначається кінетика тепловиділення в системі цемент – вода. Відповідні дослідження дозволили авторам зробити висновки стосовно положень теорії тужавлення і тверднення цементів.

Ушеровим-Маршаком О.В. та іншими дослідниками підкреслено, що результати вимірювань адіабатичним або ізотермічним методами далеко не завжди адекватні реальним неізотермічним умовам технологічних процесів [279]. У цьому джерелі наведено метод оцінювання тепловиділення при твердненні цементів у неізотермічних умовах, котрі програмуються.

1.2.4. Основні фактори, що впливають на інтенсивність тепловиділення цементу при гідратації

Тепловиділення різних портландцементів коливається в значних межах залежно від їх мінералогічного складу та наявності домішок (наприклад, золи-винесення).

За величиною тепловиділення й характером розвитку тепловиділення в часі чисті мінерали розташовуються так: $C_3A > C_3S > C_4AF > C_2S$ [67].

У таблиці 1.2 наведено показники тепловиділення мінералів у різні терміни їх тверднення, отримані Огороковим С.Д. та іншими дослідниками [29].

Таблиця 1.2

Теплота гідратації чистих клінкерних мінералів, Дж/г [29]

Мінерали	Термін тверднення, доба					Повна гідратація	
	3	7	28	90	180	дослідник Огороков	дослідники Лерч, Богг
$3CaO \cdot SiO_2$	405	460	487	520	567	670	500
$\beta\text{-}2CaO \cdot SiO_2$	63	105	168	197	230	350	345
$3CaO \cdot Al_2O_3$	590	660	873	930	1030	1060	870
$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O$	176	250	376	415	–	570	419
3							

Александровським С.В. у книзі [3] показано, що найбільша теплота гідратації притаманна високоалюмінатним і високоалітовим цементам, найменше тепловиділення мають білітові цементы.

У книзі [166] Мчедлов-Петросян О.П. із співавторами відображають теплоту гідратації алюмінатів (табл. 1.3).

Таблиця 1.3

Теплота гідратації алюмінатів, кДж/кг [166]

Безводний мінерал	Кінцевий продукт гідратації	Теплота гідратації, кДж/кг
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	865 – 895
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3(8 - 11,6)\text{H}_2\text{O}$	985 – 1090
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 31\text{H}_2\text{O}$	1450
$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 13\text{H}_2\text{O} - 4\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot 13\text{H}_2\text{O}$	419

Дослідження Огорокова С.Д. показали, що різні види портландцементів при твердненні характеризуються тепловиділенням у таких межах: через 3 доби – 113...376 Дж/г цементу; через 7 діб – 130...418 Дж/г цементу; через 28 діб – 176...553 Дж/г цементу; через 3 місяці – 192...570 Дж/г цементу [29].

У книзі [68] Заседателевим І.Б. та співавторами зазначено, що для портландцементу тепловиділення при орієнтовних розрахунках може бути визначено за формулою

$$q_n = a_n C_3S + b_n C_2S + c_n C_3A + d_n C_4AF, \quad (1.2)$$

де q_n – теплота гідратації цементу за n діб, кДж/кг;

a_n, b_n, c_n, d_n – коефіцієнти тепловиділення мінералів [68];

C_3S, C_2S, C_3A, C_4AF – вміст відповідних мінералів у цементі, %.

У статті [233] Ратц Є.М. та Хряпченкова І.М. наводять результати досліджень тепловиділення портландцементу ПЦ 500, виготовленого різними заводами. У статті [24] Круць Т.М. із співавторами показують термодинамічні характеристики гідратації різних видів цементів для АЦВ (табл. 1.4).

Таблиця 1.4

Термокінетичні характеристики гідратації цементів [24]

Тип портланд- цементу	Перший екзо- ефект, мВт/г	Індукцій- ний період τ , год	Основний екзоефект		Теплота гідратації, Дж/г, 24 год
			момент досягнен- ня τ , год	величина, мВт/г	
ПЦ І-500-Н	49,65	2,80	10,07	4,87	246,89
ПЦ ІІ/А-ІІІ- 400-Н	25,85	2,34	8,49	4,16	229,24
ПЦ для АЦВ	37,36	2,48	9,07	3,33	195,85

У статтях [183, 184] Павлюк В.В. із співавторами показують вплив мінералогічного складу цементів на процеси тепловиділення при гідратації (рис. 1.1).

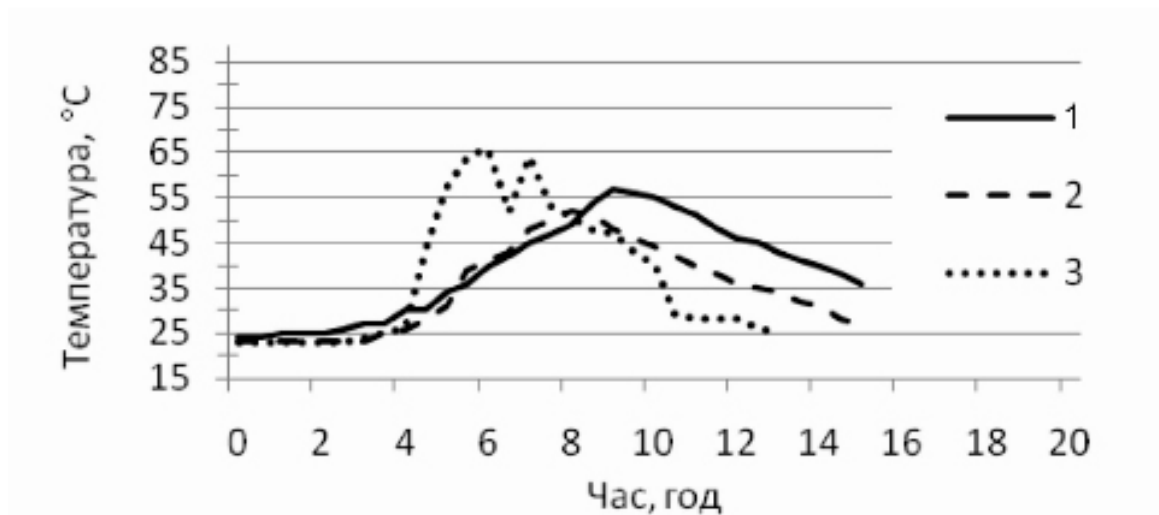


Рис.1.1. Температурні криві розігріву цементів різного мінералогічного складу:

- 1 – ПЦ виробництва ВАТ «Волиньцемент»;
- 2 – ПЦ виробництва ВАТ «Подільський цемент»;
- 3 – ПЦ виробництва ВАТ «Івано-Франківськцемент»

У статті [183] Павлюк В.В. із співавторами відображають вплив меленої золи-винесення Ладижинської ТЕС на тепловиділення цементу виробництва ВАТ «Івано-Франківськцемент» (рис. 1.2). Підтверджено, що тепловиділення при твердненні в'язучого з додаванням золи менше, ніж при твердненні портландцементу.

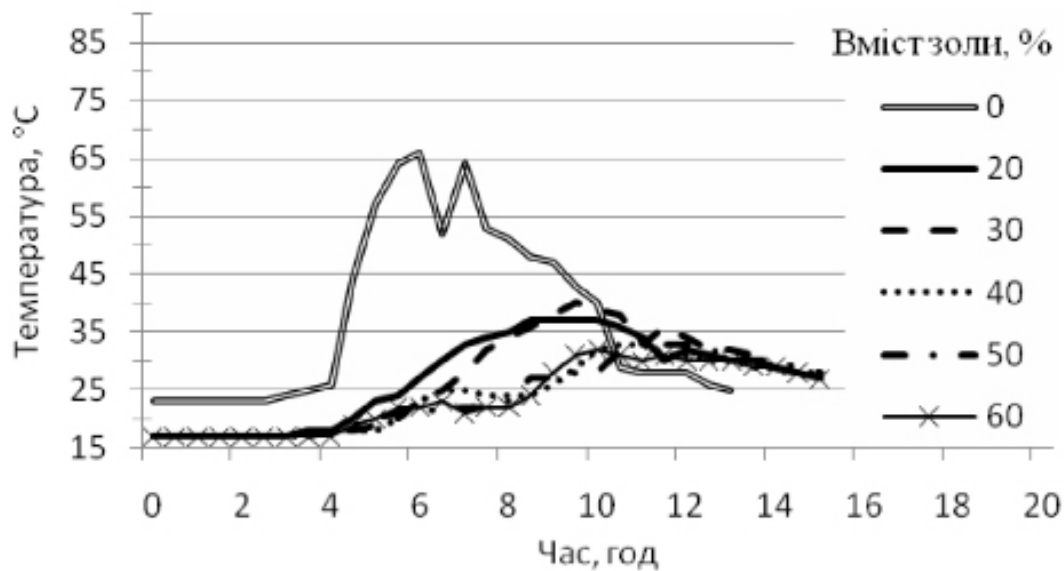


Рис. 1.2. Температурні криві розігріву ПЦ виробництва ВАТ «Івано-Франківськцемент», модифікованого золою-винесення Ладижинської ТЕС

Г. Кног та інші у статті [327] аналізують особливості тверднення бетону, до складу якого входить зола. У статті [306] Штріповим І.К. спільно з іншими дослідниками наведено експериментальні дані, котрі підтверджують, що вміст шлаку знижує тепловиділення цементу при гідратації та погіршує його міцність.

Серед технологічних характеристик, які суттєво впливають на кінетику гідратації й набору міцності бетоном – дисперсність і гранулометрія [3, 34, 67, 166 та ін.]. Так, у джерелі [34] показано тепловиділення цементу залежно від дисперсності (4000, 3600, 3200 см²/г). Різниця між тепловиділенням цементів з різними показниками тонкості помелу приблизно через 40 год гідратації цементу стає мінімальною [34].

Ушеровим-Маршаком О.В. та Синякіним А.Г. у роботі [280] наголошено, що теплові впливи змінюють умови протікання й характер процесів тверднення цементу, насамперед їх швидкість і повноту, обумовлюють значну варіацію показників міцності та ступеня використання потенційних можливостей в'язучого. Теплові впливи характеризуються моментом, інтенсивністю і тривалістю застосування.

Так, Запорожцем І.Д. із співавторами у книзі [67] наведено експериментальні дані стосовно ізотермічного тверднення бетонів різних складів. Показано, що підвищення температури в межах від 10 до 30°C призводить до підвищення інтенсивності тепловиділення цементу, особливо в ранні строки. У книзі [47] наведено питомі тепловиділення цементу різних видів і марок залежно від температури і часу тверднення бетону. Частину цих показників відображено в табл. 1.5.

Таблиця 1.5

Питоме тепловиділення цементу різних марок
залежно від температури і часу твердіння бетону [47]

Вид і марка цементу	Температура, °С	Тепловиділення, кДж/кг, через діб							
		0,25	0,5	1	2	3	7	14	28
Портланд-цемент М400	5	–	–	29,4	63,0	84,0	168,0	210,0	252,0
	10	12,6	25,2	50,4	105,0	138,6	210,0	252,0	294,0
	20	46,2	67,2	105,0	168,0	210,0	273,0	315,0	336,0
	40	54,6	126,0	189,0	231,0	273,0	315,0	336,0	–
	60	105,0	168,0	231,0	273,0	315,0	336,0	–	–
Портланд-цемент М500	5	12,6	21,0	42,0	84,0	126,0	189,0	231,0	252,0
	10	21,0	42,0	63,0	105,0	159,6	252,0	285,6	315,0
	20	50,4	84,0	126,0	189,0	252,0	294,0	336,0	378,0
	40	105,0	168,0	210,0	268,8	294,0	357,0	378,0	–
	60	189,0	231,0	273,0	315,0	348,6	378,0	–	–

У статті [138] Лівша Р.Я. та Карасьова Л.О. наводять показники тепловиділення тверднучого цементу залежно від температури цього процесу (20 і 40°C) для портландцементів М500 Кам'янець-Подільського, Здолбунівського і Криворізького заводів. Авторами зазначено: «Із зростанням температури тверднення закономірно зростає інтенсивність і повнота перебігу реакцій гідратації для усіх цементів, які досліджувались».

У статті [25] Буровою З.А. зі співавторами показано, що інтенсивність тепловиділення активної частини бетону (серед складових бетону – зола) в процесі гідратації при температурах 10, 20, 30, 40 та 50°C підвищується відповідно до зростання температури.

У статті [295] Циаком М. відображено вплив температурного фактора на кінетику гідратації цементів (СЕМ І 42,5R та СЕМ І 42,5 HSR NA) в присутності суперпластифікатора RBV (та за відсутності цієї добавки). Досліди було проведено при температурах 25, 35 і 45°C. У статті зазначено, що швидкість процесів гідратації зростає при підвищенні температури зразків.

У джерелах [36, 160] відображено вплив від'ємних температур на процеси гідратації цементу. У книзі [29] зазначено, що при температурах від 0 до 5...8°C відбувається суттєве уповільнення цих процесів (у 2 – 3 рази порівняно з твердненням при звичайних температурах), а при температурах нижче 0°C ці процеси повністю припиняються.

У статті [339] Paulini P. розглянуто енергетичні аспекти процесу гідратації цементу. У статті [337] Maruyama I. із співавторами показали вплив температури на інтенсивність гідратації цементу. У статті [343] Steven H. Kosmatka та інші дослідники підкреслили значення температурного фактора в процесі тверднення бетону.

Заседателевим І.Б. із співавторами у книзі [68] зазначено, що кінетика тепловиділення цементу може бути оцінена за допомогою функції такого вигляду

$$f_t = K \frac{t-t_0}{\varepsilon_t}, \quad (1.3)$$

де K – температурний коефіцієнт швидкості;

t – температура ізотермічного процесу, °C;

t_0 – базова температура тверднення, °C;

ε_t – характерна температурна різниця.

У цій книзі рекомендовано для портландцементів використовувати таку формулу для визначення температурної функції

$$f_t = 1,5^{\frac{t-20}{\varepsilon_t}}, \quad (1.4)$$

де $\varepsilon_t = 6,2 + 0,095 (t - 20).$ (1.5)

Наведені закономірності стосуються процесів, які відбуваються в ізотермічних умовах [68].

У статті [163] Федосовим С.В. із співавторами відображено основні принципи прогнозування набору міцності бетоном. Це прогнозування здійснюється з використанням рівняння Арреніуса

$$K = A \cdot \exp\left(-\frac{E}{k \cdot T}\right), \quad (1.6)$$

де K – константа швидкості хімічної реакції, s^{-1} ;

A – сталий коефіцієнт (число хімічних взаємодій за одиницю часу), s^{-1} ;

E – енергія активації хімічної реакції, Дж;

T – температура, К;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана.

Запропонований метод розрахунку зміни в часі міцності бетону може бути використано для фіксованих значень температури $T = \text{const}$ [163].

У книзі [152] наведено залежність для визначення тепловиділення цементу при тепловологісній обробці бетону парою, на основі якої складено відповідні графіки, подані в книзі [22],

$$q_{\text{ец}} = 1,85 q_{\text{ец}28} (В/Ц)^{0,44} (1 - ae^{-b\Theta}), \quad (1.7)$$

де $q_{\text{ец}28}$ – тепловиділення 1 кг цементу при 28-добовому твердненні в нормальних умовах, ккал/кг;

a, b – коефіцієнти, котрі визначаються залежно від величини z ;

z – кількість град-год за період тепловологісної обробки бетонних та залізобетонних виробів,

$$z = \overline{t_6} (\tau_n + \tau_{\text{ив}}), \quad (1.8)$$

де τ_n – тривалість періоду нагрівання бетонних (залізобетонних) виробів, год;

$\tau_{\text{ив}}$ – тривалість періоду ізотермічного витримування бетонних (залізобетонних) виробів, год;

$\overline{t_6}$ – середня температура бетонних (залізобетонних) виробів за період тепловологісної обробки, °С.

Ці ж дані відображено в джерелах [151, 161].

У джерелі [240] підкреслено, що при відносно низьких температурах (20 – 40°С) збільшення В/Ц призводить до підвищення швидкості тепловиділення, а при температурах 60 – 80°С – навпаки, більш низьке В/Ц призводить до підвищення швидкості тепловиділення.

Будь-які добавки змінюють кінетику гідратації цементу. Прискорення або уповільнення темпу гідратації цементу відображається на термокінетичних і температурно-часових залежностях [250].

Дія пластифікуючих добавок обумовлюється утворенням тонких плівок на поверхнях цементних часточок, які створюють додаткові перешкоди для проникнення води до цементних часток. Ці тонкі плівки (при регламентованому вмісті добавок) руйнуються в результаті збільшення в об'ємі цементних зерен при гідратації. Тому уповільнення процесу гідратації цементу відбувається лише в початкові терміни. Застосування добавок у підвищеній кількості може суттєво знизити тепловий ефект упродовж тривалого терміну [67].

У книзі [232] Ратіновим В.Б. і Розенбергом Т.І. добавки - пластифікатори поділено на ті, що прискорюють взаємодію цементу з рідкою фазою в момент їх контакту, але потім уповільнюють наступну гідратацію, та ті, які прискорюють гідратацію цементу.

У статті [256] Кабусь О.В. із співавторами відображають вплив суперпластифікатора на температурні залежності тверднення цементу (ССПЦ 500 Д20) при вказаних виробником граничних концентраціях добавки (від 0,5 до 2%). Установлено, що вмістом добавки можна регулювати тривалість індукційного періоду без зменшення повноти тепловиділення при подальшому твердненні.

У статті [184] Павлюк В.В. та співавтори показують результати експериментальних досліджень тепловиділення цементного тіста з використанням добавок - пластифікаторів. Установлено, що для отримання максимального ефекту від екзотермії цементу доцільно застосовувати суперпластифікатори на нафталінформальдегідній основі С-3 і на меламінформальдегідній основі «Melment F10», котрі не сповільнюють швидкість гідратації цементу.

У статті [242] Руновою Р.Ф., Троян В.В. та Прянишниковим О.В. відображено вплив «архітектури» суперпластифікаторів полікарбонатного типу на екзотермію цементних систем, у тому числі таких, що вміщують мінеральні добавки різної природи.

У статті [249] Соповим В.П. разом із співавторами наведено результати експериментальних досліджень комплексних добавок системи «Релаксол», які дозволили авторам зробити низку висновків, зокрема: прискорювачі тверднення обумовлюють збільшення абсолютної величини основного екзоефекту, зменшення тривалості індукційного періоду і зростання теплоти гідратації на 10%; пластифікатор блокує початкові реакції за рахунок адсорбційних явищ, значно знижує повноту й інтенсивність тепловиділення на ранніх стадіях тверднення цементу.

У статті [138] Лівшею Р.Я. та Карасьовою Л.О. наголошено: «Домішка «Релаксол» підвищує інтенсивність і повноту тепловиділення за гідратації цементу в ранні терміни».

У статті [1] Адамцевичем О.А. та іншими дослідниками зазначено, що в інтервалі 0 – 220 год сумарне тепловиділення при гідратації цементу (до складу якого входить добавка «Релаксол» на основі тіосульфату і роданіду натрію), перевищує аналогічний показник для контрольного складу цементу (без добавки). Найбільша ефективність прискорення тверднення досягається в проміжок часу 48 – 168 год. Через 220 год значення сумарного тепловиділення цементу з добавкою «Релаксол» і цементу без добавки однакові [1].

У статті [74] Ізотовим В.С. та Ібрагімовим Р.А. указано, що застосування гіперпластифікаторів «Мобет - 2», «Sika - 20NE» і «Sika - 5Neu», «Одолит - Т», «Одолит - К», «Одолит - KW», «Remicrete SP10», суперпластифікатора С-3 призводить до уповільнення процесу гідратації цементу в ранній період.

У статті [295] Ціаком М. зазначено, що застосування суперпластифікатора RBV для цементів СЕМ І 42,5R та СЕМ І 42,5 HSR NA призводить до зменшення показників тепловиділення цементів за наявності добавок порівняно із цементами без добавок. У статті [228] Пуляєвим С.М. та іншими дослідниками показано, що суперпластифікатор «ViskoCrete 5 Neu» (на основі полікарбонату) не впливає на тепловиділення цементу (при певному дозуванні).

У джерелі [290] Хігеровичем М.І. та Баєром В.Є. наголошено, що уповільнення процесу початку структуроутворення цементного тіста з гідрофобно-пластифікуючими добавками триває впродовж 4 – 7 год.

У статті [269] Уласевичем В.П. і співавторами підкреслено, що дослідження основних властивостей важких бетонів, модифікованих комплексною добавкою STG-3, показали ефективність її застосування в якості прискорювача тверднення цих бетонів у нормальних умовах.

У статті [233] Ратц Е.М. та Хряпченкова І.Н. відобразили результати досліджень впливу різних видів хімічних добавок (прискорювачів тверднення,

суперпластифікаторів, гіперпластифікаторів і добавок комплексної дії) на інтенсивність тепловиділення портландцементу. У статті [185] Павлюк В.В. із співавторами відображають позитивний вплив прискорювачів тверднення «NITCAL» та «КРІОПЛАСТ П20» на тепловиділення портландцементу.

У статті [17] Бібик М.С. із співавторами наводять результати досліджень зміни температури тверднучих зразків із цементного тіста, виготовлених: без хімічних добавок; з прискорювачем тверднення ХК; з уповільнювачем тверднення ТБН (рис. 1.3).

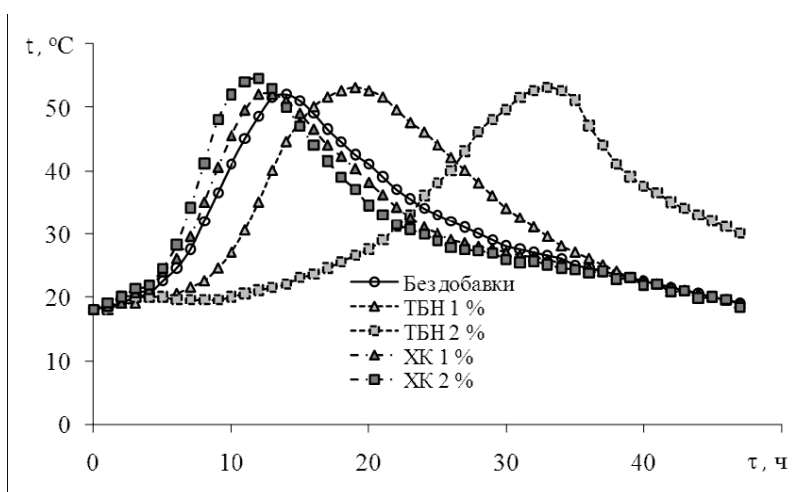


Рис.1.3. Залежність температури цементного тіста (t) від часу тверднення (τ):

прискорювач тверднення – ХК, уповільнювач тверднення – ТБН

Дослідження тепловиділення цементу при гідратації відображено також у роботах [5, 39, 167, 276, 317, 321, 323, 324, 347].

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Під час тепловологісної та теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів та конструкцій у них виникає напружений стан, що погіршує їх властивості. Процеси тепловологісної й теплової обробки цих виробів та конструкцій енергомісткі.

Напрацьовано різні способи зменшення деструктивних процесів у бетоні та зменшення енерговитрат при вказаних технологічних процесах. Серед напрямів розв'язання цих проблем:

- упровадження геліотермообробки бетонних і залізобетонних виробів;
- прискорення тверднення бетонних і залізобетонних виробів без використання теплоносія.

Однак більшість способів геліотермообробки бетонних і залізобетонних виробів та конструкцій призначено для впровадження в умовах спекотного клімату. Так, у ДБН А.3.1-8-96 зазначено: «Геліотеплообробку виробів суцільного перерізу завтовшки до 400 мм з важкого бетону передбачають у весняно-літньо-осінній періоди року в районах південніше 50° п. ш. з великою кількістю сонячних днів на рік. При цьому ТО виробів передбачають у геліоформах з сонцесприйнятними і теплоакумулюючими покриттями (СВІТАП)» [46].

2. Дослідники (серед них Подгорнов М.І., Nadiradze А.) пропонують здійснювати геліотермообробку бетонних та залізобетонних виробів із використанням нагрітого повітря. Але:

- нагріте повітря, яке надходить до камери, зумовлює випаровування вологи з поверхні виробів, що недопустимо;
- запропоновані схеми геліотермообробки вказаних виробів можуть бути використані тільки в умовах спекотного клімату.

У патенті на корисну модель [194] Кугаєвською Т.С., Шульгіним В.В. та Свініним О.В. запропоновано здійснювати теплову обробку бетонних і

залізобетонних виробів у закритих формах із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії або в повітронагрівачі.

Особливості цього способу:

- можливість застосування не тільки в умовах спекотного клімату;
- волога з поверхні виробів не випаровується;
- простота конструкції та експлуатації системи теплопостачання камери.

У патенті на корисну модель [199] Кугаєвською Т.С. та Шульгіним В.В. запропоновано здійснювати теплову обробку бетонних та залізобетонних виробів із використанням:

– нагрітого в колекторі сонячної енергії повітря (вироби знаходяться в закритих формах);

– тільки теплоти гідратації цементу (вироби знаходяться або у відкритих, або в закритих формах); у холодний період року доцільно розглянути можливість використання традиційних джерел теплоти.

3. Для оптимізації тепловологісної та теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів та для впровадження нових способів ТО здійснюється математичне моделювання відповідних процесів тепло- і масообміну або теплообміну.

Математичні моделі процесів теплообміну в установках для теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів у закритих формах із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії або в повітронагрівачі [194, 199] мають певні відмінності порівняно з математичними моделями процесів теплообміну (чи тепло- і масообміну) в інших установках для теплової та тепловологісної обробки вказаних виробів. Основні відмінності цих математичних моделей обумовлено факторами, відображеними нижче.

1) Конструкції установок при тепловій обробці в закритих формах бетонних і залізобетонних виробів із використанням нагрітого в колекторі сонячної енергії повітря [194, 199] відрізняються від конструкцій інших установок. Відповідно відрізняються математичні моделі, які характеризують процеси теплообміну у складових цих установок.

2) При тепловологісній та тепловій обробці бетонних і залізобетонних виробів у відкритих формах відбувається масообмін між їх поверхнею та середовищем камери.

При тепловій обробці бетонних і залізобетонних виробів у закритих формах масообмін відсутній.

3) При тепловій обробці бетонних і залізобетонних виробів у закритих формах із використанням пари (касетні установки й т.ін.), як і при тепловій обробці цих виробів у закритих формах із використанням нагрітого повітря [194, 199], масообмін між виробами та теплоносієм не відбувається. Основні відмінності між зазначеними способами:

- різні конструкції установок (як підкреслено вище);

- різні теплоносії: процеси теплообміну при конденсації пари всередині парового відсіку відрізняються від процесів теплообміну між нагрітим повітрям і поверхнями гідроізованих виробів.

4) При геліотермообробці бетонних та залізобетонних виробів із використанням світлопрозорих теплоізолюючих покриттів (СВІТАП):

- не відбувається примусової циркуляції повітря в установці (на відміну від теплової обробки цих виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії [194, 199]);

- сонячна енергія надходить до СВІТАП, значна частка цієї енергії проходить крізь СВІТАП і нагріває вироби (при геліотермообробці бетонних та залізобетонних виробів, відображеній в патентах [194, 199], сонячна енергія надходить до світлопрозорого покриття колектора, значна частка цієї енергії проходить крізь це покриття і нагріває абсорбер; повітря, яке рухається в колекторі, нагрівається внаслідок конвективного теплообміну з абсорбером та потрапляє до камери, де нагріває вироби).

5) При тепловій обробці бетонних і залізобетонних виробів із використанням ТЕНів між джерелами теплоти та відповідними поверхнями виробів і конструкцій камери відбувається променевий теплообмін. Також у камері наявний: теплообмін унаслідок природної конвекції; променевий

теплообмін між поверхнями виробів та відповідними поверхнями конструкцій камери.

При тепловій обробці бетонних і залізобетонних виробів із застосуванням повітря, нагрітого в колекторі сонячної [194, 199] або в електричному повітрянагрівачі [194], теплообмін між теплоносієм та поверхнями виробів і конструкцій камери відбувається внаслідок наявності вимушеної конвекції. Також у камері здійснюється променевий теплообмін між поверхнями виробів і відповідними поверхнями конструкцій камери.

б) При створенні математичних моделей процесів теплообміну в плоскому колекторі сонячної енергії власної конструкції та при виборі колектора сонячної енергії, виготовленого в умовах серійного виробництва, потрібно враховувати, що ці колектори є складовою відповідної установки, в якій:

- наявне додаткове джерело теплоти – тепловиділення при гідратації цементу;

- температура повітря на вході до колектора є змінною у часі, оскільки температурне поле в камері, де тверднуть вироби, і в повітропроводах – нестационарне.

7) Для підвищення температури тверднучих монолітних тонкостінних конструкцій може використовуватися нагріте повітря [239]. При тепловій обробці в закритих формах бетонних і залізобетонних виробів (патенти [194, 199]) у якості теплоносія також застосовується нагріте повітря.

Але різняться: конструктивні особливості відповідних установок; граничні умови на поверхнях теплообміну тощо.

8) При тепловій обробці бетонних і залізобетонних виробів [199] за відсутності надходження сонячної енергії до колектора у весняний, теплий, та осінній періоди року використовується тільки теплота гідратації цементу.

При монолітному будівництві у низці випадків наявне єдине джерело теплоти – тепловиділення при гідратації цементу.

Але особливості теплообміну з навколишнім середовищем виробів, які тверднуть у тепловій камері, та в опалубці, відрізняються.

4. Потрібно розробити математичні моделі процесів теплообміну при тепловій обробці в закритих формах бетонних і залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії або в електричному повітрянагрівачі, та теплоти гідратації цементу.

5. Потрібно розробити методику експериментально-розрахункових досліджень теплової обробки гідроізольованих бетонних зразків і виробів із використанням нагрітого повітря та теплоти гідратації цементу.

6. У ДБН А.3.1-7-96 наголошено: «У теплий період року за наявності відповідних виробничих умов та економічної доцільності рекомендується застосовувати природне тверднення бетону виробів» [45].

Тверднення бетонних і залізобетонних виробів у камері в теплий період року надає можливість підвищити їх температуру внаслідок більш ефективного використання теплоти гідратації цементу і відповідно прискорити тверднення цих виробів відносно тверднення у повітряних умовах.

7. Дослідники, котрі вивчають вплив хімічних добавок на інтенсивність тверднення бетонних і залізобетонних виробів, зазначають вплив температурного фактора на цей процес. Але вони не здійснюють експериментальний аналіз впливу на цей процес температурного режиму тверднення вказаних виробів із використанням теплоти гідратації цементу (без застосування теплоносія).

У джерелі [262] наведено методику визначення раціональних режимів безпрогрівного витримування бетонних і залізобетонних виробів:

– ці обчислення здійснюються з використанням показників питомих тепловиділень мінералів клінкера при нормальних температурно-вологісних умовах тверднення; (однак кінетика тепловиділення мінералів клінкера залежить від кінетики зміни температури бетонних і залізобетонних виробів, яка обумовлюється співвідношенням між надходженнями теплоти до камери та витратами теплоти в камері й втратами теплоти камерою);

– визначення кінетики набору міцності бетоном виробів здійснюється за допомогою коефіцієнтів, які характеризують ступінь гідратації мінералів

клінкера при нормальних температурно-вологісних умовах тверднення; (при аналізі теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу кінетику набору міцності бетоном виробів потрібно визначати із застосуванням бетонних зразків або виробів, які тверднуть у відповідних температурних умовах).

8. При створенні математичних моделей процесів теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу потрібно знати інтенсивність тепловиділення цементу в цих умовах.

Дослідниками розроблено кілька методів визначення тепловиділення цементу при гідратації. Кожен з цих методів має свій напрямок ефективного застосування. Наприклад:

- адіабатичний метод призначено для: аналізу і регулювання температурних напружень, що виникають при зведенні масивних споруд внаслідок тепловиділення цементу при гідратації і т.ін.;

- ізотермічний та термосний методи призначено для: порівняння ефективності різних хімічних добавок; визначення сумісності добавок і цементів, і т.ін.

Разом з тим при твердненні бетонних та залізобетонних виробів у камерах із використанням тільки теплоти гідратації цементу температурне поле в досліджуваній системі – нестационарне і обумовлюється співвідношенням між надходженнями теплоти та витратами й втратами теплоти в цій системі.

Тому показники тепловиділення цементу при гідратації, які отримано за допомогою адіабатичного та ізотермічного методів, не відображають інтенсивність цього процесу в бетонних виробках при їх тепловій обробці із використанням тільки теплоти гідратації цементу.

Термосний метод може бути застосовано для дослідження інтенсивності тверднення бетонних і залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу, але за умови додаткового доопрацювання.

9. Потрібно розробити методику експериментально-розрахункових досліджень процесів теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу.

10. Потрібно розробити методологію теплової обробки:

– в закритих формах бетонних і залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії або в повітронагрівачі, та теплоти гідратації цементу; (слід підкреслити, що тепловиділення при гідратації цементу наявне при всіх способах тепловологісної та теплової обробки цих виробів).

– бетонних і залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу (вироби знаходяться або у відкритих, або в закритих формах).

У джерелах [96 – 132, 177, 194, 196, 199, 257, 328 – 336] відображено напрацювання Кугаєвської Т.С. із співавторами стосовно вказаного напрямку досліджень.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ КОМБІНОВАНИХ СПОСОБІВ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ БЕТОННИХ ТА ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ВИРОБІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПОВІТРЯ, НАГРІТОГО В КОЛЕКТОРІ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

2.1. Комбіновані способи теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії

Запропоновано два комбінованих способи теплової обробки в закритих формах бетонних та залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії.

Розглядається перший комбінований спосіб теплової обробки в закритих формах бетонних та залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії або в повітронагрівачі (патент на корисну модель [194]).

На рис. 2.1 наведено схему відповідної установки. Повітря нагрівається в колекторі сонячної енергії 1 та рухається по повітропроводу 2 до теплової камери 3, де віддає певну кількість теплоти поверхням теплообміну, відводиться з камери і спрямовується до колектора сонячної енергії. Рух повітря в системі забезпечує вентилятор 5. Напрямок потоку повітря регулюється заслінками 6.

Запропоновано застосовувати в установках для теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів плоскі колектори сонячної енергії власної конструкції. Це не виключає можливість використання в указаних установках колекторів сонячної енергії, виготовлених в умовах серійного виробництва.

У хмарні дні та в холодний період року використовується електричний повітронагрівач 4. У цьому випадку рух повітря здійснюється через ділянку 7, а не через колектор сонячної енергії.

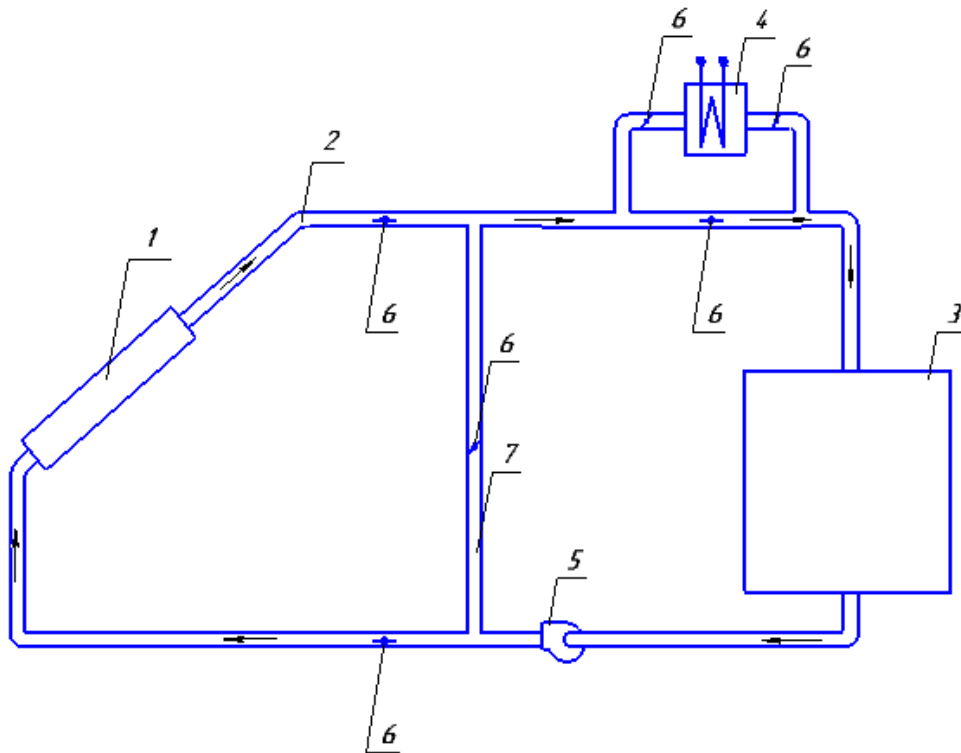


Рис. 2.1. Схема тепlopостачання камери для теплової обробки бетонних або залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії або в повітрянагрівачі:

- 1 – колектор сонячної енергії; 2 – повітропроводи;
- 3 – теплова камера; 4 – електричний повітрянагрівач;
- 5 – вентилятор; 6 – заслінки; 7 – обвідна ділянка

Розглядається другий комбінований спосіб теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів (які тверднуть у закритих формах) із використанням нагрітого в колекторі сонячної енергії повітря (патент на корисну модель [199]).

На рис. 2.2 наведено схему відповідної установки. Повітря нагрівається в колекторі сонячної енергії 1 і рухається по повітропроводу 2 до теплової камери 3, де віддає певну кількість теплоти середовищу камери. Потім повітря відводиться з камери й знову спрямовується до колектора сонячної енергії. Рух повітря в системі забезпечує вентилятор 4. У хмарні дні теплова обробка бетонних та залізобетонних виробів здійснюється тільки з використанням

теплоти, що виділяється при гідратації цементу (у цьому випадку вироби можуть тверднути у відкритих або в закритих формах).

У холодний період року доцільно здійснювати теплову обробку вказаних виробів із використанням традиційних джерел теплоти.

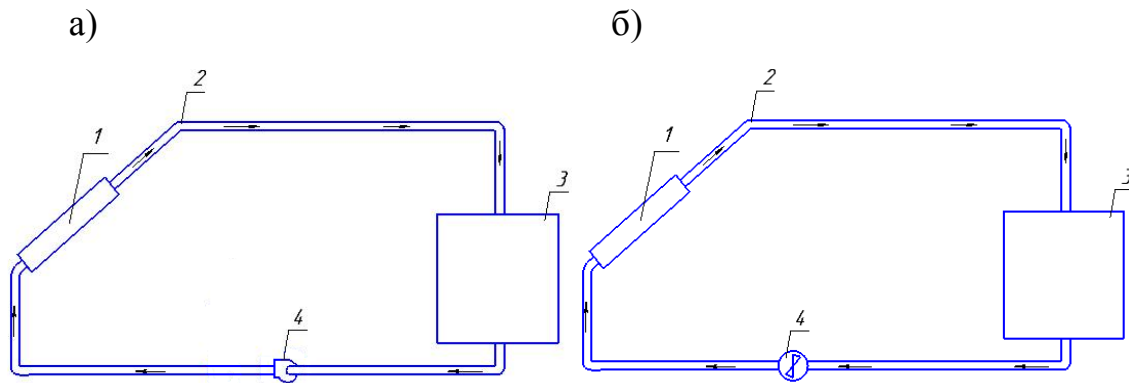


Рис. 2.2. Схема тепlopостачання камери для теплової обробки бетонних або залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії:

а) з відцентровим вентилятором; б) з осьовим вентилятором

1 – колектор сонячної енергії; 2 – повітропроводи;

3 – тепла камера; 4 – вентилятор

У схемах, наведених на рис. 2.1, 2.2, показано один вентилятор, який забезпечує рух повітря в установці для випадку, коли повітря нагрівається в колекторі сонячної енергії, а також – для випадку, коли повітря нагрівається в електричному повітрянагрівачі. Для забезпечення руху повітря в установці може бути застосовано два вентилятори: один вентилятор забезпечує рух повітря через колектор сонячної енергії, а інший вентилятор – через електричний повітрянагрівач. Слід підкреслити, що потрібно передбачати відповідні резервні вентилятори.

У хмарні дні та в холодний період року повітря при рухові в зовнішніх повітропроводах установки охолоджується. У сонячні дні літнього та весняно-осінніх періодів року на певні ділянки повітропроводів потрапляє сонячна енергія. Температура повітря на цих ділянках або знижується, або

підвищується, або не змінюється (залежно від співвідношення між відповідними надходженнями та витратами й втратами теплоти).

При проектуванні теплової камери (або при реконструкції існуючої) слід зважати на те, що рівномірність розподілення в ній нагрітого повітря залежить, зокрема, від:

- конструкції відповідної системи: у теплових камерах необхідно розташовувати систему повітропроводів для розподілу та відбору повітря; якщо надземна камера, котра проектується, має порівняно невеликі розміри, то доцільно розглянути можливість створення в протилежних стінках камери кількох отворів для подачі й відбору повітря;
- конструкції камери; розмірів і форми виробів; розмірів повітряних прошарків.

Розглядається три варіанти гідроізоляції бетонних і залізобетонних виробів. Передбачається, що гідроізоляція бетонних і залізобетонних виробів здійснюється за допомогою кришок або гідроізоляційного матеріалу.

На рис. 2.3, 3.11 відображено схеми-розгортки першого варіанта гідроізоляції вказаних виробів. Нагріте повітря рухається в просторі: між виробами; між виробами та конструкціями, що огорожують теплову камеру.

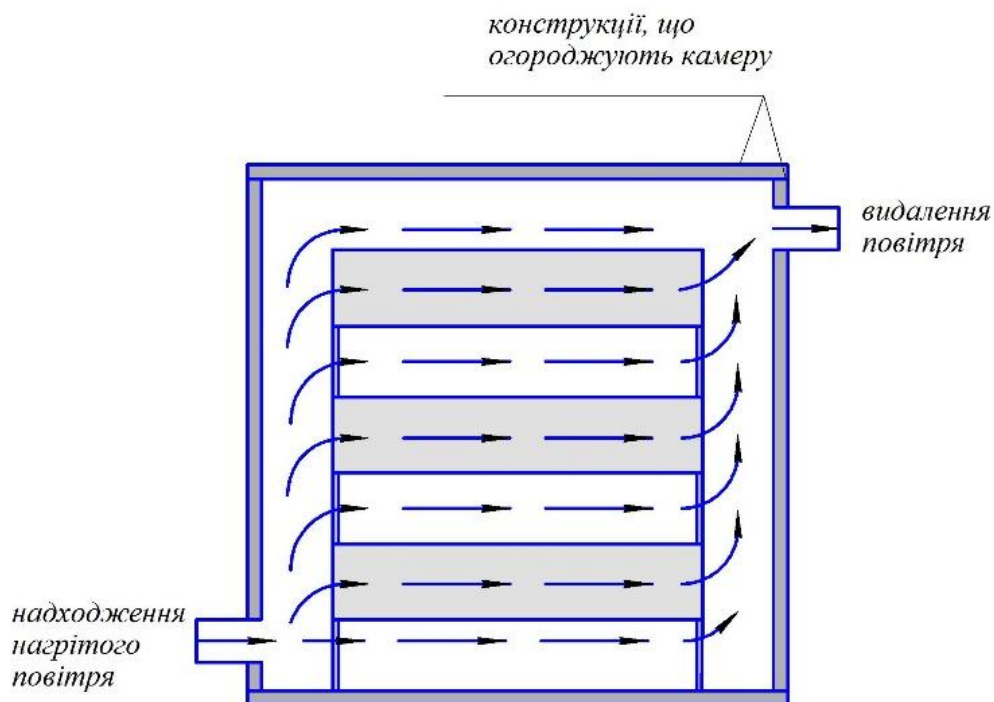


Рис. 2.3. Схема-розгортка першого варіанта гідроізоляції бетонних або залізобетонних виробів

Перевага першого варіанта гідроізоляції бетонних і залізобетонних виробів: більша, ніж при другому й третьому варіантах, площа поверхонь теплообміну нагрітого повітря з виробами. Тому при першому варіанті гідроізоляції виробів (порівняно з другим та третім варіантами):

- більша інтенсивність нагрівання виробів;
- краща рівномірність нагрівання виробів (за інших рівних факторів).

Основний недолік першого варіанта гідроізоляції бетонних і залізобетонних виробів: конструктивні особливості цього варіанта гідроізоляції вказаних виробів є більш складними порівняно з другим та третім варіантами їх гідроізоляції.

На рис. 2.4, 3.13 відображено схеми другого варіанта гідроізоляції бетонних або залізобетонних виробів. У цьому випадку здійснюється загальна гідроізоляція всіх виробів. Нагріте повітря рухається в просторі між гідроізолюваною системою та конструкціями, що огорожують камеру.

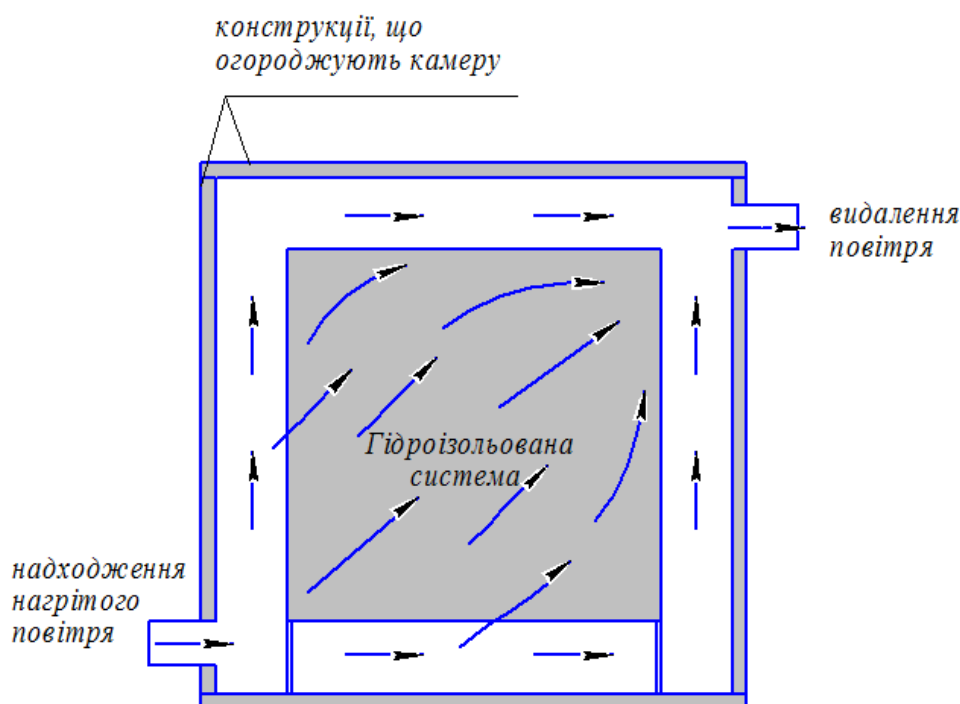


Рис. 2.4. Схема другого варіанта гідроізоляції бетонних або залізобетонних виробів

Перевага другого варіанта гідроізоляції бетонних і залізобетонних виробів: конструктивні особливості цього варіанта гідроізоляції є спрощеними (порівняно з першим варіантом).

Недоліки другого варіанта гідроізоляції вказаних виробів порівняно з першим варіантом їх гідроізоляції:

- менша площа поверхонь теплообміну нагрітого повітря з виробами; це обумовлює меншу інтенсивність і гіршу рівномірність нагрівання виробів (за інших рівних факторів);

- наявність повітряних прошарків у гідроізолюваній системі; це погіршує інтенсивність нагрівання виробів.

На рис. 2.5, 3.15 відображено схеми третього варіанта гідроізоляції бетонних або залізобетонних виробів.

Переваги та недоліки цього варіанта гідроізоляції відповідають перевагам та недолікам другого варіанта гідроізоляції вказаних виробів.

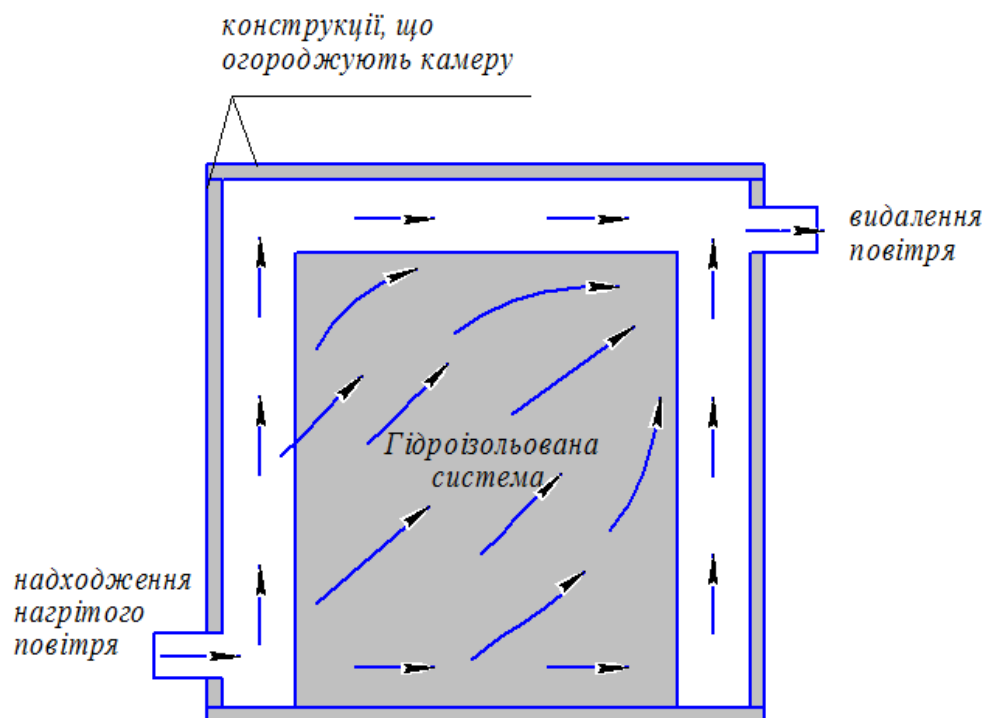


Рис. 2.5. Схема третього варіанта гідроізоляції бетонних або залізобетонних виробів

У хмарні дні та в холодний період року повітря при рухові в зовнішніх повітропроводах установки охолоджується: частка теплоти витрачається на нагрівання шару теплоізоляції повітропроводів, а після прогрівання цього шару наявні втрати теплоти в навколишнє середовище.

У сонячні дні теплого та весняно-осінніх періодів року на певні ділянки повітропроводів потрапляє сонячна енергія. Залежно від співвідношення між надходженнями та витратами й втратами теплоти температура повітря на цих ділянках або знижується, або підвищується, або не змінюється.

Підсумки:

1. Запропоновано два комбінованих способи теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів у закритих формах із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії.

2. Запропоновано три варіанти гідроізоляції бетонних і залізобетонних виробів при їх тепловій обробці з використанням нагрітого повітря.

3. Запропоновано застосовувати в установках для теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів плоскі колектори сонячної енергії власної конструкції, що не виключає можливість використання колекторів сонячної енергії, виготовлених в умовах серійного виробництва.

2.2. Методика експериментально-розрахункових досліджень теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням нагрітого повітря

Розглядаються процеси теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів у закритих формах із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії або в повітронагрівачі.

Запропоновано експериментально-розрахункові дослідження цих процесів здійснювати в два етапи:

– мета проведення першого етапу досліджень – орієнтовне прогнозування інтенсивності тверднення бетонних виробів при їх тепловій обробці з використанням нагрітого повітря;

– призначення другого етапу досліджень – більш точне прогнозування цього показника.

Другий етап досліджень може бути проведений без виконання першого етапу.

Виконання тільки другого етапу досліджень є матеріаломістким, якщо необхідно проаналізувати:

- процеси теплової обробки різних виробів;
- різні конструктивні варіанти камери, що проектується;
- різні конструктивні варіанти колектора сонячної енергії;
- різну витрату повітря і т.ін.

Нижче відображено послідовність проведення першого етапу досліджень.

1. Здійснюється попереднє проектування:

– або виробничої установки для теплової обробки в закритих формах бетонних або залізобетонних виробів із використанням нагрітого повітря;

– або системи теплопостачання існуючої теплової камери.

2. Визначається тепловиділення цементу при гідратації.

Мета – застосування вказаного показника при математичному моделюванні досліджуваних процесів.

3. Виконується математичне моделювання процесів: теплової обробки гідроізованих бетонних виробів нагрітим повітрям; процесів теплообміну в камері в період термосного тверднення цих виробів (згідно з положеннями, відображеними в розділі 3).

Метою цього моделювання є:

- обчислення зміни температури бетонних виробів при досліджуваному способі прискорення тверднення бетонних виробів;
- попередній вибір оптимальних конструктивних рішень установки.

4. Створюється лабораторна установка (принцип дії якої показано в підрозділі 5.2).

5. У лабораторній установці відтворюється інтенсивність зміни температури бетонних зразків, обчислена при математичному моделюванні досліджуваного процесу.

Склад бетону зразків і виробів повинен бути однаковим.

Нагрівання гідроізованих бетонних зразків (або виробів порівняно невеликих розмірів) та корегування їх температури в процесі теплової обробки можна здійснити при використанні:

– колектора сонячної енергії; у цьому випадку орієнтовне відтворення розрахункової зміни температури бетону може бути реалізовано внаслідок зміни площі прозорої поверхні колектора в процесі проведення експерименту;

– інфрачервоного обігрівача; інтенсивність надходження теплоти від інфрачервоного обігрівача до колектора в лабораторних дослідженнях можна регулювати за допомогою відповідного пристрою та зміною відстані між обігрівачем та прозорою поверхнею колектора;

– електричного повітрянагрівача.

Після припинення подачі в камеру нагрітого повітря відбувається термосне тверднення бетонних зразків. Температурні режими тверднення зразків у лабораторній камері та виробів у виробничій камері повинні бути однаковими.

6. Після завершення теплової обробки бетонних зразків визначається кінетика набору міцності бетоном та інші властивості бетону.

7. За необхідності здійснюється корегування: складу бетону; режиму теплової обробки бетонних зразків; конструктивних особливостей установки.

Після проведення першого етапу досліджень виконується другий етап, основні принципи якого показано нижче.

1. Створюється лабораторна установка, в котрій з використанням бетонних зразків моделюється тепла обробка бетонних виробів нагрітим повітрям та їх термосне тверднення.

При моделюванні в лабораторній установці процесів теплообміну необхідно:

- створити геометричну подібність: лабораторної камери до виробничої камери; бетонних зразків до бетонних виробів; лабораторного колектора сонячної енергії до виробничого колектора; повітропроводів;

- відтворити такі ж значення критеріїв подібності (які характеризують досліджуваний процес), як і у виробничій установці;

- урахувати теплотехнічні особливості конструкцій установки.

Також потрібно, щоб однаковими були:

- склад бетонної суміші зразків і виробів;

- для лабораторної та виробничої камер: початкова температура бетонної суміші; початкова температура форм; початкова температура конструкцій, що огорожують лабораторну й виробничу камери; початкова температура устаткування камер;

- температура та відносна вологість повітря робочої зони лабораторії й цеху впродовж терміну досліджень.

У результаті здійснення вказаних заходів в устаткуванні лабораторної установки буде відтворено максимально наближене співвідношення між надходженнями теплоти та втратами і витратами теплоти у відповідному устаткуванні виробничої установки.

Слід підкреслити, що виконати умови геометричної подібності бетонних зразків до бетонних виробів не завжди можливо внаслідок особливостей співвідношення між їх розмірами. Крім того, розміри зразків для визначення властивостей бетону в більшості випадків повинні мати обумовлені в нормах розміри ([52, 58] та ін.).

Рішення про форму й розміри зразків приймається для кожного випадку окремо, але з урахуванням того, що в лабораторній та у виробничій камерах обов'язково повинно бути однакове співвідношення між масою бетону і масою форм, та бажано, щоб максимально наближеними були модулі поверхонь виробів і зразків.

При моделюванні процесів конвективного теплообміну в колекторі сонячної енергії потрібно врахувати значення критеріїв Рейнольдса, Нуссельта і Прандтля (див. пункт 3.2.5). Моделювання процесів теплообміну здійснюється з урахуванням наявності променевого теплообміну.

При моделюванні процесів конвективного теплообміну в повітропроводах також потрібно зважати на значення вказаних вище критеріїв. Крім того, необхідно брати до уваги, що за ясного неба на частку поверхні повітропроводів потрапляє сонячна енергія.

При моделюванні процесів теплообміну в лабораторній камері потрібно, щоб не тільки значення критеріїв Рейнольдса, Нуссельта і Прандтля для лабораторної та виробничої камер були однаковими, а також – значення критеріїв Біо і Фур'є (див. [77,162, 259, 292 та ін.]).

Для виробів, які мають форму пластини:

– критерій Фур'є дорівнює

$$Fo = \frac{a\tau}{\delta^2}; \quad (2.1)$$

– критерій Біо дорівнює

$$Bi = \frac{\alpha\delta}{\lambda}, \quad (2.2)$$

де a – коефіцієнт теплопровідності бетону (для залізобетону враховується наявність арматури), m^2/c ;

τ – проміжок часу, c ;

δ – напівтовщина виробу, котрий має форму пластини, m ;

α – коефіцієнт тепловіддачі, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$.

2. Після завершення теплової обробки бетонних зразків визначається кінетика набору міцності бетоном та інші властивості бетону.

3. Аналогічно до першого етапу досліджень за результатами аналізу експериментальних даних за необхідності можливе корегування: складу бетону; інтенсивності теплової обробки бетонних зразків; конструктивних особливостей установки.

Підсумок. Розроблено методику експериментально-розрахункових досліджень теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням нагрітого повітря.

2.3. Методика експериментально-розрахункових досліджень теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу

При застосуванні другого комбінованого способу теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням нагрітого в колекторі сонячної енергії повітря (рис. 2.2) запропоновано у разі відсутності надходження сонячної енергії до колектора здійснювати їх теплову обробку з використанням тільки теплоти гідратації цементу.

Розглядається методика експериментально-розрахункових досліджень процесів теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу. Ці дослідження доцільно розділити на два етапи.

Мета проведення попереднього етапу досліджень – орієнтовне прогнозування інтенсивності тверднення бетонних і залізобетонних виробів при їх тепловій обробці з використанням теплоти гідратації цементу. Призначення основного етапу досліджень – більш точне прогнозування цього показника. Основний етап досліджень може бути здійснений без виконання попереднього етапу.

При проведенні основного етапу досліджень необхідно відтворити для бетонних зразків, котрі тверднуть у лабораторній камері, температурний режим тверднення бетонних виробів у виробничій камері (згідно з вибраними початковими умовами).

Нижче наведено послідовність проведення основного етапу досліджень.

1. Створюється лабораторна камера, в якій здійснюється моделювання процесів теплової обробки бетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу.

Сукупність наведених нижче умов дозволить максимально можливо відтворити в лабораторній камері таке ж співвідношення між надходженнями та втратами й витратами теплоти, як і у виробничій камері (котра проектується або переобладнується).

1.1. При моделюванні процесів тепло- і масообміну в лабораторній камері необхідно враховувати, що подібні явища відбуваються в геометрично подібних системах.

У випадку, що розглядається, геометрично подібними повинні бути зразки до виробів, а також лабораторна тепла камера до виробничої теплової камери.

Потрібно враховувати, що:

– умова стосовно геометричної подібності зразків до виробів не завжди може бути виконана; якщо бетонні вироби мають значну відмінність між товщиною, шириною та довжиною, то неможливо виготовити геометрично подібні їм зразки порівняно невеликих розмірів для теплової обробки в лабораторній установці;

– у певної частини виробів наявні порожнини;

– розміри зразків для визначення властивостей бетону в більшості випадків повинні мати обумовлені в нормах розміри ([52, 58] та ін.).

Разом з тим потрібно максимально можливо відтворити в зразках модуль поверхні виробів.

Співвідношення між масами зразків і форм у лабораторній камері повинно дорівнювати співвідношенню між масами виробів та форм у виробничій камері.

Необхідно враховувати наявність у виробничій камері устаткування, на якому розміщуються форми, та наявність обладнання для розподілу теплоносія в холодний період року.

1.2. При моделюванні процесів тепло- і масообміну в лабораторній камері необхідно виконати таке положення теорії подібності: подібними є ті процеси, умови однозначності яких подібні, та чисельно однакові критерії подібності, складені з величин, що входять до умов однозначності.

Значення критеріїв Біо, Фур'є, Нуссельта й дифузійного критерію Нуссельта (відповідно критеріїв, які входять до складу залежностей, за допомогою котрих визначаються критерії Нуссельта) в лабораторній та у виробничій камерах повинні бути однаковими.

Однаковими мають бути ступені чорноти поверхонь, між якими відбувається променевий теплообмін.

Критерій Нуссельта дорівнює:

– для горизонтальної поверхні
$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}; \quad (2.3)$$

– для вертикальної поверхні
$$Nu = \frac{\alpha h}{\lambda}, \quad (2.4)$$

де l, h – визначальні розміри, м;

α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·°С).

Критерій Нуссельта при природній конвекції $Nu = f(Gr Pr)$ (див. пункт 3.2.5).

Критерій Нуссельта при природній конвекції (з урахуванням наявності зовнішнього масообміну) $Nu = f(Ar Pr)$ (див. підрозділ 4.4).

Критерій Прандтля дорівнює

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \quad (2.5)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності повітря, м²/с;

ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості повітря, м²/с.

Критерій Грасгофа дорівнює:

– для горизонтальної поверхні
$$Gr = \frac{g\beta\Delta t l^3}{\nu^2}; \quad (2.6)$$

– для вертикальної поверхні
$$Gr = \frac{g\beta\Delta t h^3}{\nu^2}. \quad (2.7)$$

Критерій Релея дорівнює

$$Ra = Gr Pr. \quad (2.8)$$

Дифузійний критерій Нуссельта дорівнює

$$Nu' = \beta \frac{L}{D}, \quad (2.9)$$

або
$$Nu' = \beta' \frac{L}{D'}. \quad (2.10)$$

Дифузійний критерій Нуссельта $Nu' = f(Ar Pr')$ (див. підрозділ 4.4).

Примітка. Якщо поверхню виробів гідроізолювано, то в камері наявні тільки процеси теплообміну.

Потрібно враховувати, що:

– розміри бетонних зразків, форм і конструкцій лабораторної камери менші, ніж виробів, форм та конструкцій виробничої камери, тому інтенсивність тепловіддачі внаслідок природної конвекції й інтенсивність масообміну (якщо зразки і вироби не гідроізолювано) відповідно змінюються;

– у виробничій камері температура виробів не є однаковою внаслідок особливих умов теплообміну з навколишнім середовищем верхньої та нижньої форм, у яких тверднуть вироби.

2. Здійснюється теплова обробка бетонних зразків у лабораторній камері з використанням теплоти гідратації цементу.

При проведенні експериментальних досліджень враховується, що повинні бути однаковими:

– склад бетону зразків і виробів;

– для лабораторної та виробничої камер: початкова температура бетонної суміші; початкова температура форм; початкова температура конструкцій, що огороджують лабораторну й виробничу камери; початкова температура устаткування камер;

– температура та відносна вологість повітря робочої зони лабораторії й цеху впродовж терміну досліджень;

– теплотехнічні властивості конструкцій лабораторної та виробничої камер.

3. Визначається кінетика набору бетоном міцності при стиску. Досліджуються інші властивості бетону.

4. Проводиться аналіз отриманих експериментальних даних. За необхідності виконується корегування складу бетону та розроблення заходів щодо зменшення втрат теплоти камерою.

Застосування основного етапу досліджень є матеріаломістким, якщо необхідно проаналізувати:

- процес теплової обробки різних виробів;
- різні конструктивні варіанти камери, що проектується;
- різні варіанти теплоізоляційної конструкції для існуючої камери і т.ін.

У таких випадках доцільно виконати попередній етап досліджень.

Нижче відображено сутність попереднього етапу досліджень.

1. Створюється лабораторна камера, в якій здійснюється тепла обробка бетонних зразків із використанням тільки теплоти гідратації цементу.

Рисунки кількох варіантів лабораторних камер наведено в додатку А. Наявність або відсутність повітряних прошарків у лабораторній камері (рис. А.1 – А.6) змінює інтенсивність теплообміну в ній. Аналогічно наявність чи відсутність повітряного прошарку між днищем камери та поверхнею, на котрій розміщено форму, впливає на інтенсивність відповідного теплообміну. У дослідженнях необхідно враховувати ці фактори.

Рекомендовано лабораторну камеру попереднього етапу досліджень розміщувати на опорах (рис. А.1 – А.4). Розташування лабораторної камери на опорах спрощує визначення втрат теплоти крізь її днище. Якщо ж камеру розміщено на певній основі, то це значно ускладнює експериментальне визначення кількості теплоти, що витрачається на нагрівання цієї основи після прогрівання днища камери. Слід підкреслити, що у виробничій камері теплоізоляційний шар (за умови його наявності) розташовано над днищем камери. Тому розміщення лабораторної камери на опорах вносить певні

відмінності в процесі теплообміну лабораторної та виробничої камер, на що необхідно зважати при аналізі експериментальних даних.

2. Початкова температура матеріалів, форм, лабораторної камери, обладнання й повітря лабораторії повинна бути однаковою.

3. У лабораторній камері необхідно відтворити таке ж співвідношення між масою бетонних зразків та лабораторних форм, як і співвідношення між масами бетонних виробів та виробничих форм. Бажано максимально можливо відтворити в зразках модуль поверхні виробів.

Потрібно враховувати наявність у виробничій камері устаткування, на якому розміщуються форми, а за умови використання в камері теплоносія в холодний період року – наявність відповідного обладнання.

4. Відкрита поверхня зразків гідроізолюється.

Якщо поверхня зразків не гідроізолюється і в камері наявний відповідний повітряний прошарок (рис. А.2, А.4, А.6), то в обчисленнях необхідно: або враховувати вплив масообміну між поверхнею виробів та повітрям камери на процеси теплообміну; або обґрунтовано нехтувати наявністю цього впливу (підрозділ 4.4).

5. Упродовж терміну тверднення бетонних зразків визначаються температури: бетону; форм; конструкцій, що огорожують лабораторну камеру; повітря лабораторії.

Допускається розміщення в теплоізоляційній камері одного зразка-куба. У цьому випадку необхідно провести кілька випробовувань при однаковій початковій температурі досліджуваної системи та при однаковій температурі повітря лабораторії.

6. Термін тверднення бетонних зразків у лабораторній камері поділяється на певні проміжки часу. Для цих проміжків часу складаються теплові баланси лабораторної камери, за допомогою яких обчислюються: тепловиділення цементу при гідратації, Дж; питомі тепловиділення цементу, Дж/кг.

7. Після завершення вибраного терміну теплової обробки бетонних зразків визначається кінетика набору бетоном міцності при стиску.

8. Складаються теплові баланси виробничої камери для вибраних проміжків часу.

За допомогою теплових балансів виробничої камери (див. підрозділ 4.2) обчислюється орієнтовна зміна температури бетонних виробів упродовж вибраного терміну тверднення.

9. Здійснюється аналіз зміни розрахункової температури тверднучих у виробничій камері бетонних виробів.

Якщо:

- інтенсивність зміни розрахункової температури бетонних виробів та експериментально визначеної температури бетонних зразків під час їх теплової обробки незначно відрізняється;

- температурно-вологісні умови зберігання бетонних виробів після їх теплової обробки будуть незначно відрізнятися від температурно-вологісних умов зберігання бетонних зразків,

то і кінетика набору міцності при стиску бетонних виробів та зразків упродовж досліджуваного терміну буде незначно різнитися.

Якщо інтенсивність зміни розрахункової температури бетонних виробів і експериментально визначеної температури бетонних зразків під час їх теплової обробки суттєво різняться, то і кінетика набору міцності при стиску бетонних виробів та зразків упродовж їх теплової обробки буде відповідно різнитися.

10. За необхідності виконується корегування складу бетону й розроблення заходів щодо зменшення втрат теплоти камерою.

Досліджуються інші властивості бетону.

Нижче наведено методику обчислення питомих тепловиділень цементу при гідратації в період зростання температури тверднучих у лабораторній камері (відображеній на рис. А.2) гідроізольованих бетонних зразків.

За умов:

- температура зовнішньої поверхні конструкцій, що огорожують теплоізоляційну камеру, дорівнює температурі повітря приміщення;

– температура бетону вища, ніж температура нагрітої частини цих конструкцій,

кількість теплоти Q_E , Дж, що виділяється при взаємодії цементу з водою впродовж i -го проміжку часу, обчислюється за залежністю

$$Q_E = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5, \quad (2.11)$$

де Q_1 – кількість теплоти, що витрачається впродовж i -го проміжку часу на нагрівання бетонних зразків при їх твердненні, Дж;

Q_2 – кількість теплоти, що витрачається впродовж i -го проміжку часу на нагрівання форм, Дж;

Q_3 – кількість теплоти, що витрачається впродовж i -го проміжку часу на нагрівання конструкцій, що огорожують лабораторну камеру (конструкції прогріто по товщині не повністю), Дж;

Q_4 – кількість теплоти, що витрачається впродовж i -го проміжку часу на нагрівання капсул, у яких розташовано термодатчики, призначені для вимірювання температури в тверднучих бетонних зразках, Дж;

Q_5 – кількість теплоти, що витрачається впродовж i -го проміжку часу на нагрівання опор, на яких розташовано бетонні зразки, Дж.

В обчисленнях нехтують кількістю теплоти, що витрачається на нагрівання: повітря камери; гідроізоляційного матеріалу та термодатчиків (за необхідності враховують) .

Якщо всередині бетонних зразків розташовано капсули (в яких розміщено термодатчики), то цей фактор необхідно враховувати при аналізі показників міцності при стиску бетонних зразків, визначених руйнівним методом. Якщо термодатчики розміщено на поверхні бетонних виробів, то цей фактор потрібно враховувати при аналізі зміни температури бетонних зразків у процесі їх твердіння в тепловій камері.

За умов:

– температура зовнішніх поверхонь конструкцій, що огороджують лабораторну теплоізоляційну камеру, вища, ніж температура повітря приміщення;

– температура бетону вища, ніж температура цих конструкцій, кількість теплоти Q_E , що виділяється при взаємодії цементу з водою впродовж i -го проміжку часу, Дж, дорівнює

$$Q_E = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7, \quad (2.12)$$

де Q_3 – кількість теплоти, що витрачається впродовж i -го проміжку часу на нагрівання конструкцій, які огороджують камеру (конструкції прогріто по товщині повністю), Дж;

Q_6 – втрати теплоти камерою в навколишнє середовище впродовж i -го проміжку часу, Дж;

Q_7 – витрати теплоти на нагрівання опор камери впродовж i -го проміжку часу, Дж;

пояснення до інших величин представлено вище.

Підсумок. Розроблено методику експериментально-розрахункових досліджень теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Розглянуто особливості двох комбінованих способів теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів у закритих формах із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії (патенти на корисну модель [192, 197]). При відсутності надходження сонячної енергії до колектора прискорення тверднення цих виробів здійснюється:

а) із використанням повітря, нагрітого в повітронагрівачі, та теплоти гідратації цементу; (при довільному способі прискорення тверднення бетонних і залізобетонних виробів наявні екзотермічні реакції гідратації цементу);

б) із використанням тільки теплоти гідратації цементу; якщо температура конструкцій, котрі огорожують камеру (та температура устаткування камери) вища, ніж температура тверднучих виробів, то певний час вироби нагріваються також і внаслідок теплообміну з ними.

У холодний період року в існуючих камерах доцільно використовувати традиційні теплоносії.

2. Проаналізовано основні переваги та недоліки трьох запропонованих варіантів гідроізоляції бетонних і залізобетонних виробів при їх тепловій обробці з використанням нагрітого повітря.

3. Запропоновано застосовувати в установках для теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів плоскі колектори сонячної енергії власної конструкції, що надає можливість:

а) виконувати лабораторні дослідження процесів теплової обробки нагрітим повітрям гідроізольованих бетонних зразків (і виробів порівняно невеликих розмірів) із використанням плоских колекторів сонячної енергії власної конструкції, котрі є геометрично подібними до колекторів, які передбачається використовувати у промислових установках;

використання для лабораторних досліджень колекторів сонячної енергії, виготовлених в умовах серійного виробництва, неможливе, оскільки теплова продуктивність цих колекторів є такою, що інтенсивність нагрівання кількох

бетонних зразків (або виробів невеликих розмірів) буде значно більшою, ніж інтенсивність нагрівання виробів у реальній установці;

б) здійснювати математичне моделювання процесів теплообміну в установках для теплової обробки бетонних виробів нагрітим у колекторі сонячної енергії повітрям за умов різних конструктивних рішень установки або її складових.

Разом з тим не виключається можливість використання у виробничій установці колекторів сонячної енергії, виготовлених в умовах серійного виробництва.

4. Розроблено методики експериментально-розрахункових досліджень теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів:

- із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії або в повітронагрівачі, та теплоти гідратації цементу;
- із використанням теплоти гідратації цементу.

Указані методики надають змогу:

- прогнозувати кінетику набору міцності бетонними і залізобетонними виробами (та формування інших властивостей) при їх тепловій обробці в досліджуваних умовах;
- визначати ефективні склади бетону;
- визначати оптимальні режими теплової обробки нагрітим повітрям бетонних і залізобетонних виробів, що тверднуть у закритих формах;
- приймати оптимальні конструктивні рішення відповідних установок;
- здійснювати техніко-економічне обґрунтування умов, за яких доцільне впровадження у виробництво досліджуваних способів теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ БЕТОННИХ ТА ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ВИРОБІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НАГРІТОГО ПОВІТРЯ

3.1. Математичні моделі процесів теплообміну в плоских колекторах сонячної енергії

3.1.1. Загальні положення

Розглядається плоский колектор сонячної енергії, в якому нагрівається повітря з метою подальшого його використання для теплової обробки бетонних або залізобетонних виробів. Повітря рухається в просторі між одношаровим світлопрозорим покриттям і металевою пластиною (абсорбером), котру розташовано над шаром теплоізоляції.

На рис. 3.1 показано спрощену схему плоского колектора сонячної енергії власної конструкції. На цій схемі не відображено конструктивні елементи колектора, які призначено для взаємного розташування його складових. Декілька варіантів плоского колектора з конструктивними елементами відображено на рис. 5.3, 5.6, 5.7 (підрозділ 5.2) та в додатку Б.

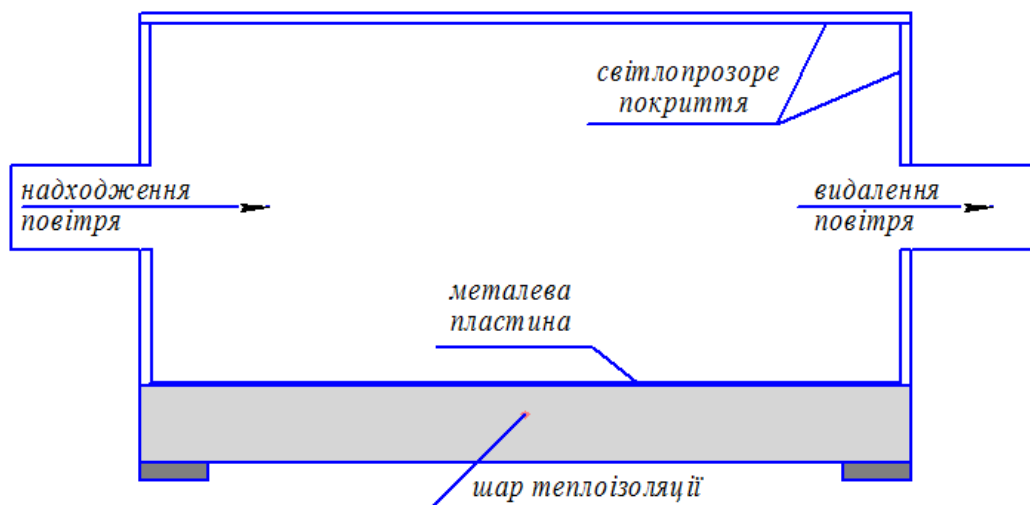


Рис. 3.1. Схема плоского колектора сонячної енергії

Принцип складання теплових балансів колектора сонячної енергії спочатку показано з урахуванням спрощеної розрахункової схеми колектора (рис. 3.1): прийнято, що площа конструктивних елементів колектора (призначення яких – компонування складових колектора) мінімально можлива і впливом цих конструктивних елементів на процеси теплообміну нехтують.

Якщо розрахункова схема колектора сонячної енергії відповідає рис. 3.1 (з урахуванням наведеного вище спрощення), то визначення інтенсивності нагрівання повітря в ньому здійснюється за допомогою:

- теплового балансу світлопрозорого покриття;
- сумісного теплового балансу теплосприймаючої металевої пластини та шару теплоізоляції;
- загального теплового балансу колектора сонячної енергії.

Якщо між теплосприймаючим металевим шаром і шаром утеплювача розміщено конструктивний шар (рис. Б.2,а), то визначення інтенсивності нагрівання повітря в ньому здійснюється за допомогою: теплового балансу світлопрозорого покриття; сумісного теплового балансу теплосприймаючої металевої пластини, конструктивного шару та шару теплоізоляції; загального теплового балансу колектора сонячної енергії.

3.1.2. Теплові баланси світлопрозорого покриття плоского колектора сонячної енергії

Мета складання теплових балансів світлопрозорого покриття плоского колектора сонячної енергії – визначення зміни температури цього покриття.

Температурне поле в колекторі сонячної енергії в процесі нагрівання повітря – нестационарне. Загальний термін, упродовж якого відбувається нагрівання повітря, розділяється на проміжки часу тривалістю Δt . Визначення максимального проміжку часу $\Delta t_{\text{макс}}$ здійснюється згідно з рекомендаціями, наведеними в пункті 3.2.4.

Кількість сонячної енергії Q_C , Дж, що надходить до світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії впродовж i -го проміжку часу, розподіляється так:

$$Q_C = Q_A + Q_R + Q_D, \quad (3.1)$$

де Q_C – кількість сонячної енергії, що надходить до світлопрозорого покриття колектора впродовж i -го проміжку часу, Дж;

Q_A – кількість сонячної енергії, що поглинається світлопрозорим покриттям колектора впродовж i -го проміжку часу, Дж,

$$Q_A = A Q_C, \quad (3.2)$$

де A – поглинальна здатність світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії;

Q_R – кількість сонячної енергії, що відбивається світлопрозорим покриттям колектора впродовж i -го проміжку часу, Дж,

$$Q_R = R Q_C, \quad (3.3)$$

де R – відбивна здатність світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії;

Q_D – кількість сонячної енергії, що проходить крізь світлопрозоре покриття колектора впродовж i -го проміжку часу, Дж,

$$Q_D = D Q_C, \quad (3.4)$$

де D – пропускна здатність світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії.

Тепловий баланс світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії для i -го проміжку часу (рис. 3.2) має вигляд

$$Q_A + Q_{\text{ПС}} + Q_{\text{МСП}} = Q_{\text{СК}} + Q_{\text{СГ}} + Q_{\text{СВ}}, \quad (3.5)$$

де $Q_{\text{ПС}}$ – кількість теплоти, що передається впродовж i -го проміжку часу від повітря, котре рухається в колекторі сонячної енергії, до світлопрозорого покриття, Дж;

$Q_{\text{МСП}}$ – кількість теплоти, що передається від поверхні металевої пластини до внутрішньої поверхні світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії впродовж і-го проміжку часу внаслідок променевого теплообміну між ними, Дж;

$Q_{\text{СК}}$ – зміна тепловмісту світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії, Дж;

$Q_{\text{СГ}}$, $Q_{\text{СВ}}$ – кількість теплоти, що втрачається впродовж і-го проміжку часу в навколишнє середовище відповідно крізь горизонтально розташовану та вертикально розташовані конструкції світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії, Дж.

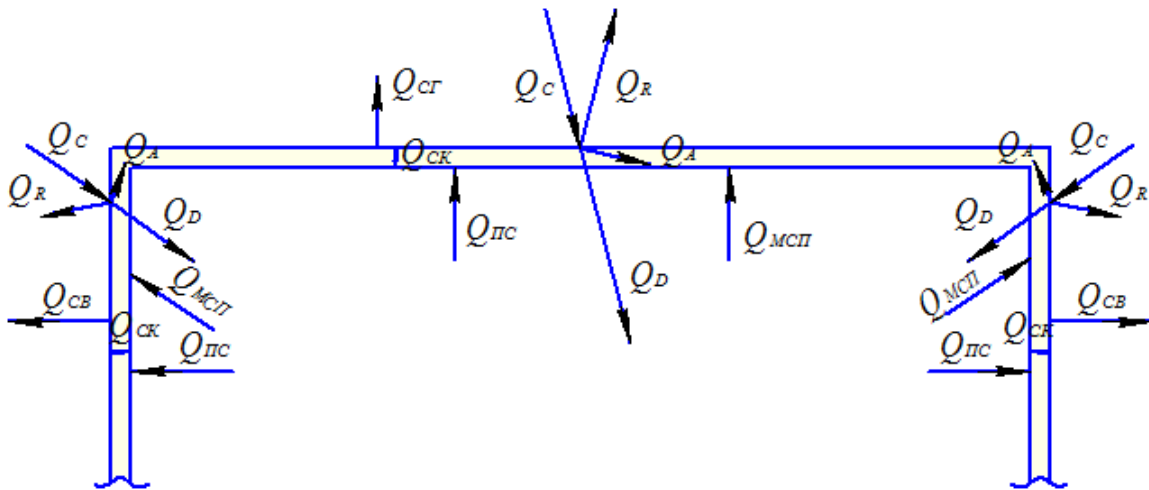


Рис. 3.2. Схематичне відображення складових рівняння (3.5)

Якщо в певний проміжок часу температура внутрішньої поверхні світлопрозорого покриття вища, ніж температура повітря, котре рухається в колекторі сонячної енергії, то тепловий баланс світлопрозорого покриття (рис. 3.3) має вигляд

$$Q_A + Q_{\text{МСП}} = Q_{\text{СП}} + Q_{\text{СК}} + Q_{\text{СГ}} + Q_{\text{СВ}}, \quad (3.6)$$

де $Q_{\text{СП}}$ – кількість теплоти, що передається впродовж вибраного проміжку часу від світлопрозорого покриття до повітря, котре рухається в колекторі сонячної енергії, Дж.

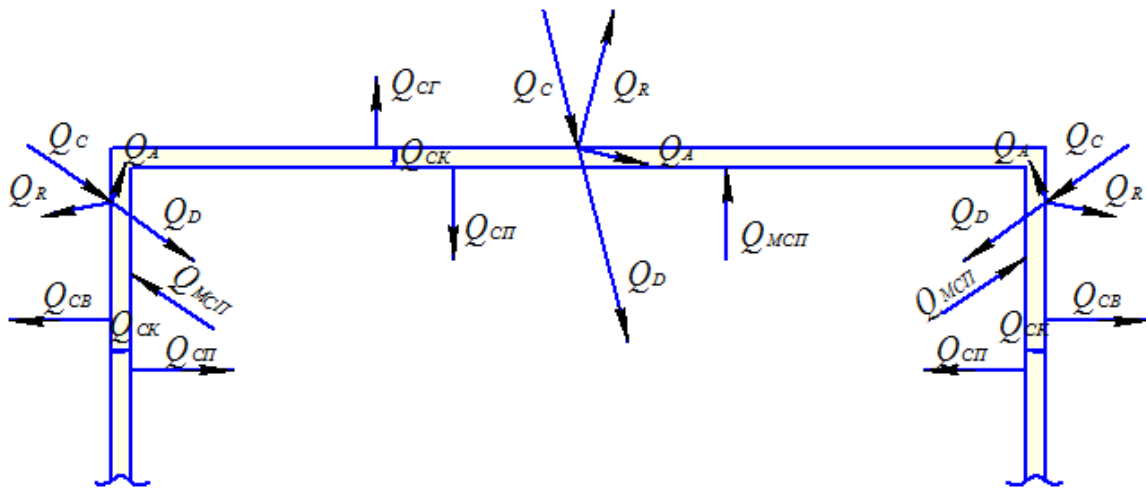


Рис. 3.3. Схематичне відображення складових рівняння (3.6)

Кількість теплоти, що передається впродовж і-го проміжку часу від повітря, котре рухається в колекторі сонячної енергії, до внутрішньої поверхні світлопрозорого покриття, Дж, обчислюється за формулою

$$Q_{\text{ПС}} = \alpha_c (t_{\text{ПОВ}} - t_{\text{СВ}}) F_{\text{СВ}} \Delta\tau; \quad (3.7)$$

прийнято спрощення: світлопрозоре покриття прогріто рівномірно, тобто $t_{\text{СВ}} = t_c$, тоді

$$Q_{\text{ПС}} = \alpha_c (t_{\text{ПОВ}} - t_c) F_{\text{СВ}} \Delta\tau, \quad (3.8)$$

де α_c – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·°С);

$t_{\text{ПОВ}}$ – середня за і-й проміжок часу температура повітря, яке рухається в колекторі сонячної енергії, °С;

$t_{\text{СВ}}$ – середня за і-й проміжок часу температура внутрішніх поверхонь світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії, °С;

t_c – середня за і-й проміжок часу температура світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії, °С;

$F_{\text{СВ}}$ – площа внутрішніх поверхонь світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії, м²;

$\Delta\tau$ – проміжок часу, с.

Середня за і-й проміжок часу температура повітря в колекторі сонячної енергії, °С, обчислюється за рівнянням

$$t_{\text{ПОВ}} = 0,5 (t_{\text{ПН}} + t_{\text{ПВ}}), \quad (3.9)$$

де $t_{\text{ПН}}$, $t_{\text{ПВ}}$ – середня за і-й проміжок часу температура повітря відповідно на вході до колектора та на виході з нього, °С.

Середня за і-й проміжок часу температура світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії t_c , °С, дорівнює

$$t_c = 0,5 (t_{\text{СП}} + t_{\text{СК}}), \quad (3.10)$$

де $t_{\text{СП}}$, $t_{\text{СК}}$ – температура світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії на початку й наприкінці і-го проміжку часу, °С.

Зміна тепловмісту світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії впродовж і-го проміжку часу, Дж, дорівнює

$$Q_{\text{СК}} = c_c m_c (t_{\text{СК}} - t_{\text{СП}}), \quad (3.11)$$

де c_c – питома масова теплоємність матеріалу світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії, Дж/(кг·°С);

m_c – маса світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії, кг.

Кількість теплоти, що втрачається впродовж і-го проміжку часу в навколишнє середовище крізь горизонтально розташовану конструкцію світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії за відсутності вітру, Дж, розраховується за формулою

$$Q_{\text{СГ}} = \alpha_{\text{СГ}} (t_{\text{СЗГ}} - t_{\text{НС}}) F_{\text{СЗГ}} \Delta\tau; \quad (3.12)$$

з урахуванням прийнятого спрощення (світлопрозоре покриття колектора прогріто рівномірно, тому $t_{\text{СЗГ}} = t_c$)

$$Q_{\text{СГ}} = \alpha_{\text{СГ}} (t_c - t_{\text{НС}}) F_{\text{СЗГ}} \Delta\tau, \quad (3.13)$$

де $\alpha_{\text{СГ}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні горизонтальної конструкції світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії до навколишнього середовища, Вт/(м²·°С);

$t_{c3Г}$ – середня за і-й проміжок часу температура зовнішньої поверхні горизонтально розташованої конструкції світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії, °С;

t_{HC} – температура навколишнього середовища, °С;

$F_{c3Г}$ – площа горизонтально розташованої зовнішньої поверхні світлопрозорого покриття колектора, м².

Кількість теплоти, що втрачається впродовж і-го проміжку часу в навколишнє середовище крізь вертикально розташовані конструкції світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії за відсутності вітру, Дж, розраховується за формулою

$$Q_{CB} = \alpha_{CB} (t_{c3B} - t_{HC}) F_{c3B} \Delta\tau; \quad (3.14)$$

з урахуванням прийнятого спрощення (світлопрозоре покриття прогріто рівномірно, тому $t_{c3B} = t_c$)

$$Q_{CB} = \alpha_{CB} (t_c - t_{HC}) F_{c3B} \Delta\tau, \quad (3.15)$$

де α_{CB} – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішніх поверхонь вертикальних конструкцій світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії до навколишнього середовища, Вт/(м²·°С);

t_{c3B} – середня за і-й проміжок часу температура зовнішніх поверхонь вертикально розташованих конструкцій світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії, °С;

F_{c3B} – площа вертикально розташованих зовнішніх поверхонь світлопрозорого покриття колектора, м².

За наявності вітру

$$Q_{cГ} + Q_{CB} = \alpha_{c3} (t_{c3} - t_{HC}) (F_{c3Г} + F_{c3B}) \Delta\tau; \quad (3.16)$$

з урахуванням прийнятого спрощення ($t_{c3B} = t_c$)

$$Q_{cГ} + Q_{CB} = \alpha_{c3} (t_c - t_{HC}) (F_{c3Г} + F_{c3B}) \Delta\tau, \quad (3.17)$$

де $t_{с3}$ – середня за i -й проміжок часу температура зовнішніх поверхонь світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії, °С;

$\alpha_{с3}$ – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішніх поверхонь світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії до навколишнього середовища, Вт/(м²·°С).

Підсумки:

1. Розроблено теплові баланси світлопрозорого покриття плоского колектора сонячної енергії.

2. Уточнення зміни температури світлопрозорого покриття плоского колектора сонячної енергії здійснюється при сумісному розв'язанні всіх теплових балансів установки для теплової обробки бетонних або залізобетонних виробів нагрітим повітрям.

3.1.3. Теплові баланси теплосприймаючої металевієї пластини та шару теплоізоляції плоского колектора сонячної енергії

Мета складання сумісних теплових балансів теплосприймаючої металевієї пластини (абсорбера) й шару теплоізоляції (або сумісних теплових балансів теплосприймаючої металевієї пластини, конструктивного шару та шару теплоізоляції колектора сонячної енергії) – визначення зміни температури цих складових колектора.

Сумісний тепловий баланс теплосприймаючої металевієї пластини та шару теплоізоляції колектора сонячної енергії (з урахуванням розрахункової схеми колектора, відображеної на рис. 3.1) для i -го проміжку часу має вигляд

$$Q_D = Q_M + Q_{МП} + Q_{МСП} + Q_T + Q_{ТГ}, \quad (3.18)$$

де Q_D – кількість сонячної енергії, що проходить крізь світлопрозоре покриття колектора сонячної енергії впродовж i -го проміжку часу, Дж;

Q_M – зміна тепловмісту металевієї пластини впродовж i -го проміжку часу, Дж;

$Q_{МП}$ – кількість теплоти, що передається впродовж і-го проміжку часу від металевої пластини до повітря, котре рухається в колекторі сонячної енергії, Дж;

$Q_{МСП}$ – кількість теплоти, що передається від поверхні металевої пластини до внутрішньої поверхні світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії впродовж і-го проміжку часу внаслідок променевого теплообміну між ними, Дж;

Q_T – кількість теплоти, що витрачається на нагрівання шару теплоізоляції колектора сонячної енергії впродовж і-го проміжку часу, Дж; пояснення стосовно температурного поля шару теплоізоляції наведено в пункті 2.3.3;

$Q_{ТГ}$ – кількість теплоти, що втрачається впродовж і-го проміжку часу в навколишнє середовище крізь горизонтальну поверхню шару теплоізоляції колектора сонячної енергії, Дж (за умови наявності цих втрат теплоти в і-й проміжок часу).

Схематичне відображення складових теплового балансу (3.18) теплосприймаючого металевого покриття та шару теплоізоляції колектора сонячної енергії показано на рис. 3.4.

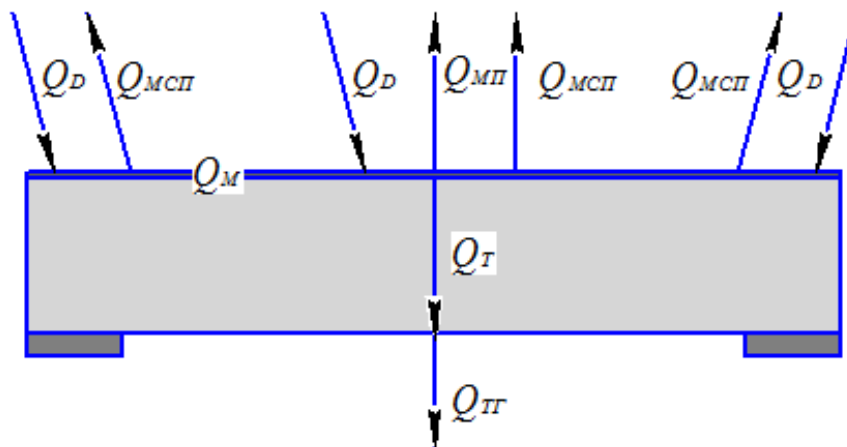


Рис. 3.4. Схематичне відображення складових рівняння (3.18)

Для весняно-осінніх періодів року сумісний тепловий баланс металевої пластини й шару теплоізоляції колектора сонячної енергії для і-го проміжку часу має вигляд

$$Q_D = Q_M + Q_{МП} + Q_{МСП} + Q_T + Q_{ТГ} + Q_{ТВ} + Q_{ОП} + Q_{ОПН}, \quad (3.19)$$

де $Q_{ТВ}$ – кількість теплоти, що втрачається впродовж і-го проміжку часу в навколишнє середовище крізь вертикальні поверхні шару теплоізоляції колектора сонячної енергії, Дж;

$Q_{ОП}$ – кількість теплоти, що витрачається впродовж і-го проміжку часу на нагрівання опор, Дж (за умови наявності цих втрат теплоти в і-й проміжок часу);

$Q_{ОПН}$ – кількість теплоти, що втрачається впродовж і-го проміжку часу в навколишнє середовище опорами, Дж (за умови наявності цих втрат теплоти в цей проміжок часу).

Схематичне відображення складових теплового балансу (3.19) теплосприймаючого металевого покриття та шару теплоізоляції колектора сонячної енергії для весняно-осінніх періодів показано на рис. 3.5.

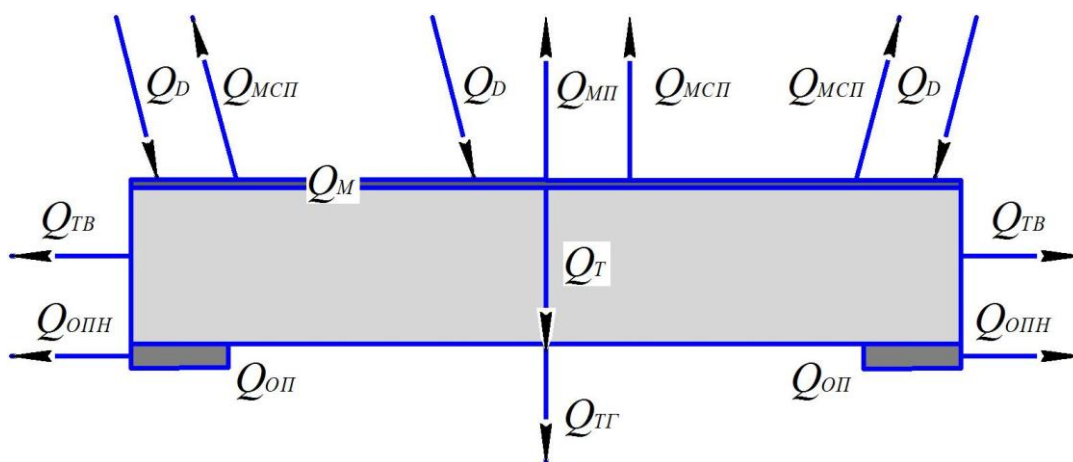


Рис. 3.5. Схематичне відображення складових рівняння (3.19)

Зміна тепловмісту металевієї пластини впродовж і-го проміжку часу, Дж, обчислюється за залежністю

$$Q_M = c_M m_M (t_{МК} - t_{МП}), \quad (3.20)$$

де c_M – питома масова теплоємність металу, Дж/(кг·°С);

$t_{МП}$, $t_{МК}$ – температури металеві пластини колектора сонячної енергії відповідно на початку та наприкінці i -го проміжку часу, °С;

m_M – маса металеві пластини колектора сонячної енергії, кг.

Кількість теплоти, що передається впродовж i -го проміжку часу від металеві пластини до повітря, котре рухається в колекторі, Дж, обчислюється за формулою

$$Q_{МП} = \alpha_C (t_{МЗ} - t_{ПОВ}) F_M \Delta\tau; \quad (3.21)$$

прийнято, що металева пластина прогріта рівномірно, тобто $t_{МЗ} = t_M$, тоді

$$Q_{МП} = \alpha_C (t_M - t_{ПОВ}) F_M \Delta\tau, \quad (3.22)$$

де α_C – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·°С);

$t_{МЗ}$ – середня за i -й проміжок часу температура зовнішньої поверхні металеві пластини колектора сонячної енергії, °С;

t_M – середня за i -й проміжок часу температура металеві пластини колектора сонячної енергії, °С;

$t_{ПОВ}$ – середня за i -й проміжок часу температура повітря в колекторі сонячної енергії, °С;

F_M – площа металеві пластини колектора сонячної енергії, м²;

$\Delta\tau$ – проміжок часу, с.

Середня за i -й проміжок часу температура металеві пластини t_M дорівнює

$$t_M = 0,5 (t_{МП} + t_{МК}). \quad (3.23)$$

Кількість теплоти $Q_{МСП}$, що передається впродовж i -го проміжку часу від металеві пластини до світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії внаслідок наявності променевого теплообміну між ними, Дж, обчислюється за формулою, наведеною, зокрема, в джерелах [79, 165],

$$Q_{МСП} = \varepsilon_{\pi} c_0 \left[\left[\left(\frac{T_{МЗ}}{100} \right) \right]^4 - \left[\left(\frac{T_{СВ}}{100} \right) \right]^4 \right] F_M \Delta\tau; \quad (3.24)$$

з урахуванням попередньо прийнятих спрощень (світлопрозоре покриття і металева пластина прогріті рівномірно) $T_{M3} = T_M$, $T_{CB} = T_C$, тоді

$$Q_{MCP} = \varepsilon_{\pi} c_0 \left[\left[\left(\frac{T_M}{100} \right) \right]^4 - \left[\left(\frac{T_C}{100} \right) \right]^4 \right] F_M \Delta \tau, \quad (3.25)$$

де T_{M3} – середня за і-й проміжок часу абсолютна температура зовнішньої поверхні металевої пластини колектора сонячної енергії, К;

T_M – середня за і-й проміжок часу абсолютна температура металевої пластини колектора сонячної енергії, К;

T_{CB} – середня за і-й проміжок часу абсолютна температура внутрішніх поверхонь світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії, К;

T_C – середня за і-й проміжок часу абсолютна температура світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії, К;

c_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, $Вт/(м^2 \cdot К^4)$;

ε_{π} – приведений ступінь чорноти, яка обчислюється за формулою

$$\varepsilon_{\pi} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_M} + \frac{F_M}{F_{CB}} \left(\frac{1}{\varepsilon_C} - 1 \right)}, \quad (3.26)$$

де ε_M – ступінь чорноти металу;

ε_C – ступінь чорноти світлопрозорого покриття;

F_M – площа металевої пластини колектора сонячної енергії, $м^2$;

F_{CB} – площа внутрішніх поверхонь світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії, $м^2$.

Методику обчислення кількості теплоти Q_T , що витрачається на нагрівання шару теплоізоляції колектора сонячної енергії впродовж і-го проміжку часу, наведено в пункті 3.2.4.

Кількість теплоти, що втрачається впродовж і-го проміжку часу в навколишнє середовище крізь шар теплоізоляції при відсутності вітру, Дж, обчислюється за формулами:

– для горизонтальної поверхні

$$Q_{ТГ} = \alpha_{ТГ} (t_{ТГ} - t_{НС}) F_{ТГ} \Delta\tau; \quad (3.27)$$

– для вертикальних поверхонь

$$Q_{ТВ} = \alpha_{ТВ} (t_{ТВ} - t_{НС}) F_{ТВ} \Delta\tau, \quad (3.28)$$

де $\alpha_{ТГ}$, $\alpha_{ТВ}$ – коефіцієнт тепловіддачі відповідно від горизонтально розташованої та вертикально розташованих зовнішніх поверхонь шару теплоізоляції колектора сонячної енергії до навколишнього середовища, Вт/(м²·°С);

$t_{ТГ}$, $t_{ТВ}$ – середня за і-й проміжок часу температура відповідно горизонтально розташованої та вертикально розташованих зовнішніх поверхонь шару теплоізоляції колектора сонячної енергії, °С;

$t_{НС}$ – температура навколишнього середовища, °С;

$F_{ТГ}$, $F_{ТВ}$ – площа відповідно горизонтально розташованої та вертикально розташованих поверхонь шару теплоізоляції колектора сонячної енергії, м².

За умови наявності вітру

$$Q_{ТГ} + Q_{ТВ} = \alpha_{Т} (t_{ТЗ} - t_{НС}) (F_{ТГ} + F_{ТВ}) \Delta\tau, \quad (3.29)$$

де $t_{ТЗ}$ – середня за і-й проміжок часу температура зовнішніх поверхонь шару теплоізоляції колектора сонячної енергії, °С;

$\alpha_{Т}$ – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішніх поверхонь шару теплоізоляції до навколишнього середовища, Вт/(м²·°С).

Якщо між металевою пластиною та шаром теплоізоляції розміщено конструктивний шар (наприклад, з деревини), то сумісний тепловий баланс

металевої пластини, конструктивного шару та шару теплоізоляції колектора сонячної енергії для і-го проміжку часу має вигляд

$$Q_D = Q_M + Q_K + Q_{МП} + Q_{МК} + Q_{МСП} + Q_T + Q_{ТГ}, \quad (3.30)$$

де Q_K – кількість теплоти, що витрачається на нагрівання конструктивного шару впродовж і-го проміжку часу, Дж;

$Q_{МК}$ – кількість теплоти, що передається від поверхні металевої пластини до внутрішніх поверхонь конструктивних елементів (призначених для компонування світлопрозорого покриття) впродовж і-го проміжку часу внаслідок променевого теплообміну між ними, Дж.

Складові теплового балансу (3.30) схематично відображено на рис. 3.6. Додаткові пояснення показано на рис. 3.10.

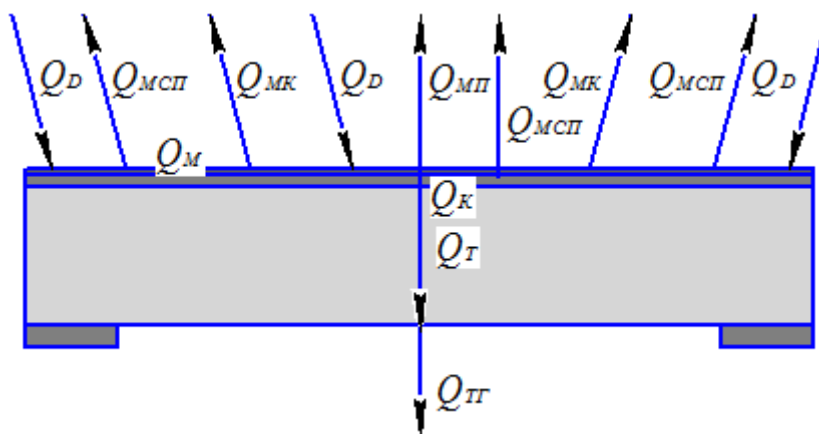


Рис. 3.6. Схематичне відображення складових рівняння (3.30)

Схематичне відображення теплового балансу металевої пластини, конструктивного шару та шару теплоізоляції колектора сонячної енергії для весняно-осінніх періодів показано на рис. 3.7.

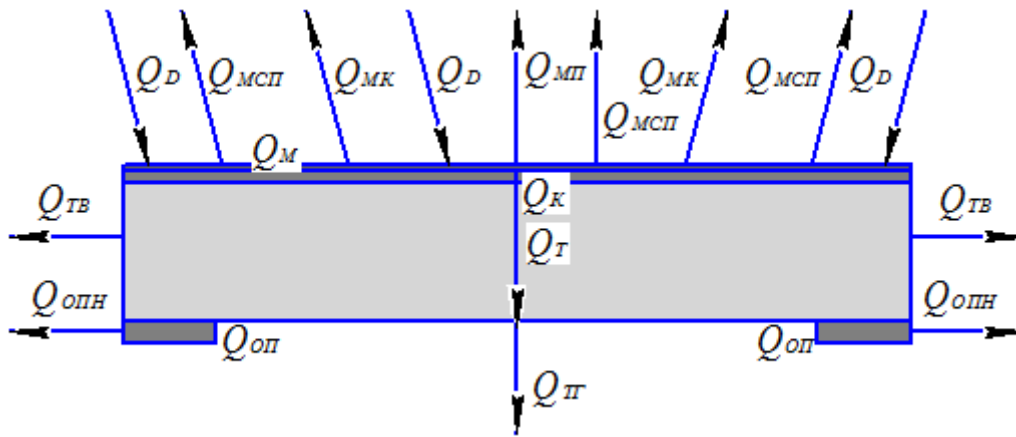


Рис. 3.7. Схематичне відображення складових теплового балансу металевої пластини, конструктивного шару та шару теплоізоляції для весняно-осінніх періодів року

Підсумки:

1. Розроблено сумісні теплові баланси теплосприймаючої металевої пластини (абсорбера) та шару теплоізоляції згідно з розрахунковою схемою колектора сонячної енергії, показаною на рис. 3.1.

Відображено корегування складових цих балансів з урахуванням наявності:

- конструктивного шару, розташованого між металевою пластинною та шаром теплоізоляції;
- конструктивних елементів, призначених для компонування світлопрозорого покриття.

2. Уточнення зміни температури теплосприймаючої металевої пластини (абсорбера) колектора сонячної енергії здійснюється при сумісному розв'язанні всіх теплових балансів установки для теплової обробки бетонних чи залізобетонних виробів нагрітим повітрям.

3.1.4. Теплові баланси плоского колектора сонячної енергії

Мета складання теплового балансу плоского колектора сонячної енергії – визначення інтенсивності нагрівання повітря впродовж вибраного проміжку часу.

Тепловий баланс колектора сонячної енергії (рис. 3.8) для і-го проміжку часу має вигляд:

$$Q_A + Q_D + Q_H = Q_B + Q_M + Q_{СК} + Q_{СГ} + Q_{СВ} + Q_T + Q_{ТГ}, \quad (3.31)$$

де Q_H – кількість теплоти, що надходить до колектора сонячної енергії з повітрям упродовж і-го проміжку часу, Дж;

Q_B – кількість теплоти, що видаляється з колектора сонячної енергії з нагрітим повітрям упродовж і-го проміжку часу, Дж;

пояснення до інших складових рівняння наведено в пунктах 3.1.2, 3.1.3.

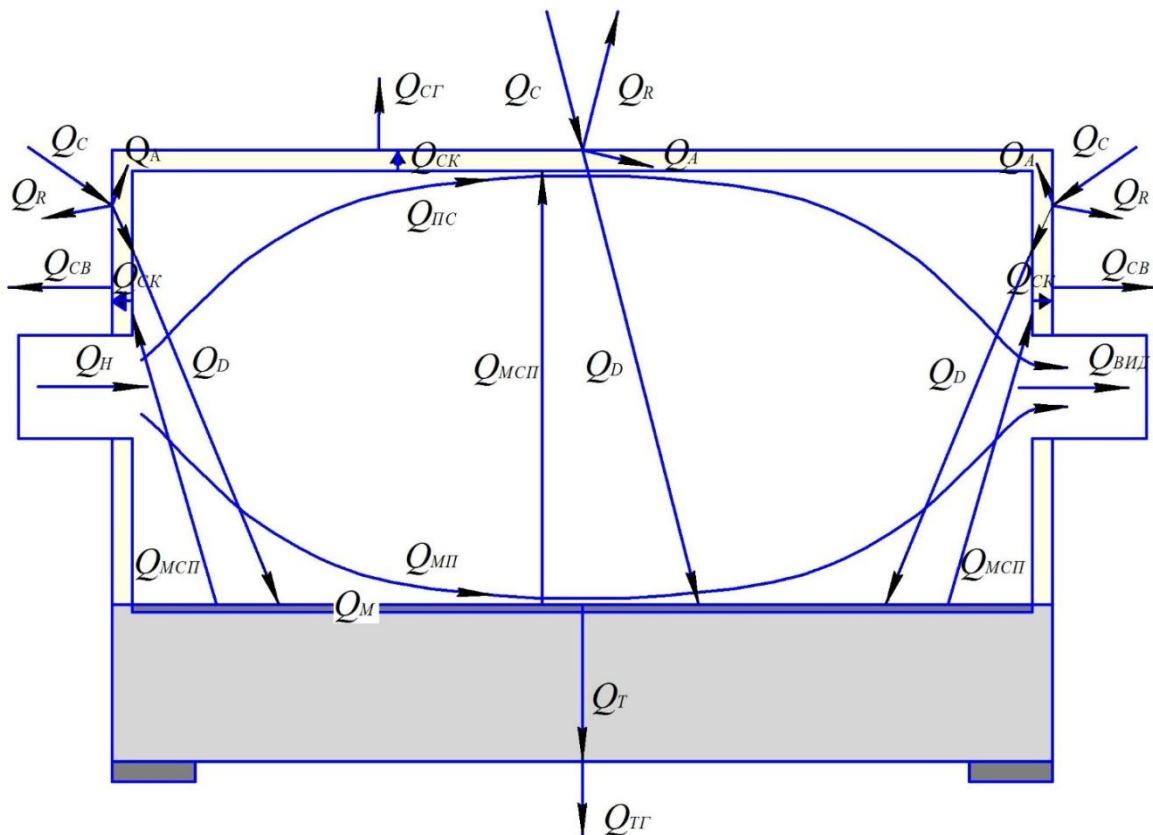


Рис. 3.8. Схематичне відображення складових рівняння (3.31)

У весняно-осінні періоди тепловий баланс колектора сонячної енергії (рис. 3.9) для і-го проміжку часу має вигляд

$$Q_A + Q_D + Q_H = Q_B + Q_M + Q_{СК} + Q_{СГ} + Q_{СВ} + Q_T + \\ + Q_{ПГ} + Q_{ТВ} + Q_{ОП} + Q_{ОПН}; \quad (3.32)$$

пояснення до складових цього рівняння наведено в 3.1.2, 3.1.3.

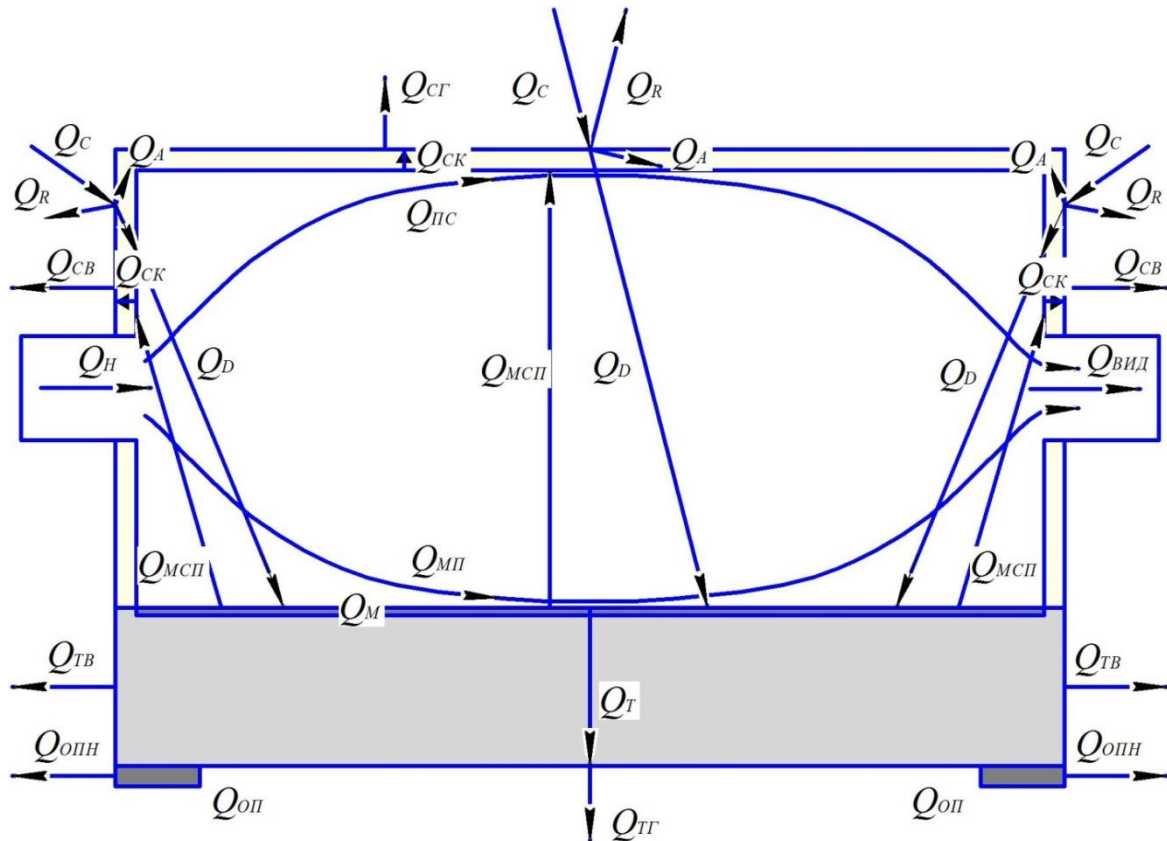


Рис. 3.9. Схематичне відображення складових рівняння (3.32)

Кількість теплоти, Дж, що надходить до колектора сонячної енергії з повітрям упродовж і-го проміжку часу, обчислюється за залежністю

$$Q_H = c_{ПН} \rho_{ПН} L t_{ПН} \Delta\tau, \quad (3.33)$$

де $t_{ПН}$ – середня за і-й проміжок часу температура повітря на вході до колектора, °С;

L – витрата повітря, $\text{м}^3/\text{с}$.

Кількість теплоти, Дж, що видаляється з колектора сонячної енергії з повітрям упродовж i -го проміжку часу, визначається за залежністю

$$Q_B = c_{\text{ПВ}} \rho_{\text{ПВ}} L t_{\text{ПВ}} \Delta\tau, \quad (3.34)$$

де $t_{\text{ПВ}}$ – середня за i -й проміжок часу температура повітря на виході з колектора, $^{\circ}\text{C}$.

Якщо розрахункова схема колектора сонячної енергії відповідає схемі, фрагмент якої відображено на рис. 3.10, то в тепловому балансі колектора будуть наявні додаткові складові.

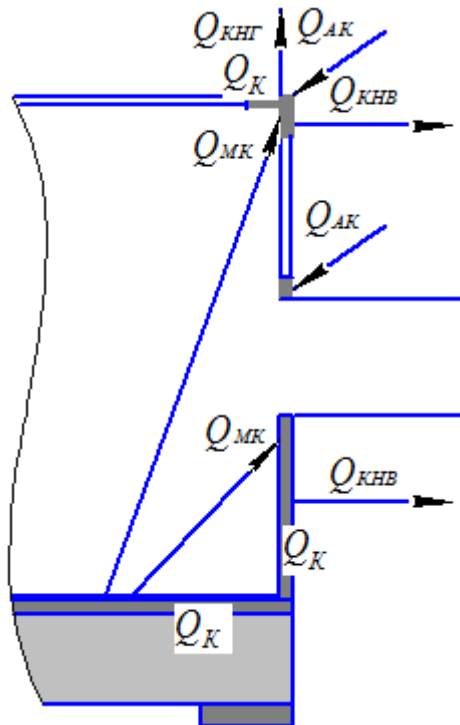


Рис. 3.10. Фрагмент колектора сонячної енергії з відображенням додаткових складових теплового балансу

Тепловий баланс колектора сонячної енергії (фрагмент якого відображено на рис. 3.10), для i -го проміжку часу (для теплого періоду року) має вигляд

$$\begin{aligned} Q_A + Q_D + Q_{AK} + Q_H = \\ = Q_B + Q_M + Q_{СК} + Q_{СГ} + Q_{СВ} + \sum Q_K + Q_{KHГ} + Q_{KHВ} + Q_T + Q_{ТГ}, \quad (3.35) \end{aligned}$$

де Q_{AK} – кількість сонячної енергії, що поглинається конструктивними елементами колектора (на які потрапляє ця енергія) впродовж i -го проміжку часу, Дж;

$\sum Q_K$ – витрати теплоти на нагрівання конструктивного шару та конструктивних елементів упродовж i -го проміжку часу, Дж; конструктивний шар розміщено між металевою пластиною та шаром теплоізоляції;

$Q_{KHГ}$, $Q_{KHВ}$ – кількість теплоти, що втрачається впродовж i -го проміжку часу в навколишнє середовище відповідно крізь горизонтальні та вертикальні поверхні конструктивних елементів колектора сонячної енергії, Дж;

пояснення до інших складових цього рівняння наведено в пунктах 3.1.2, 3.1.3.

Якщо температура конструктивних елементів (на які потрапляє сонячна енергія) та температура світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії у початковий проміжок часу вища, ніж температура повітря, котре переміщується в колекторі, то цей фактор відповідно враховується в теплових балансах.

Підсумки:

1. Розроблено теплові баланси колектора сонячної енергії з урахуванням розрахункової схеми, показаної на рис. 3.1.

Відображено корегування складових цих балансів за умови наявності конструктивного шару та конструктивних елементів.

2. Уточнення зміни температури повітря в колекторі сонячної енергії здійснюється при сумісному розв'язанні всіх теплових балансів установки для теплової обробки бетонних чи залізобетонних виробів нагрітим повітрям.

3.1.5. Алгоритм обчислення інтенсивності нагрівання повітря в плоскому колекторі сонячної енергії

Розглядається алгоритм обчислення інтенсивності нагрівання повітря в плоскому колекторі сонячної енергії, розрахункову схему якого відображено на рис. 3.1.

Обчислення здійснюються методом ітерацій (послідовних наближень).

1. Термін, упродовж якого відбувається нагрівання повітря, умовно розділяється на певні проміжки часу Δt .

Оскільки колектор сонячної енергії є складовою частиною установки, в якій відбувається теплова обробка бетонних виробів нагрітим повітрям, то прийняття рішення стосовно тривалості проміжку часу Δt для колектора сонячної енергії здійснюється сумісно з аналогічними розрахунками для теплової камери (рекомендації наведено в пункті 3.2.4).

2. Приймається попереднє значення середньої за перший проміжок часу температури повітря на виході з колектора сонячної енергії $t_{ПВ}$ та розраховується попереднє значення середньої за перший проміжок часу температури повітря в колекторі сонячної енергії $t_{ПОВ}$ за рівнянням (3.9)

$$t_{ПОВ} = 0,5 (t_{ПН} + t_{ПВ}).$$

3. Обчислюється орієнтовне значення температури світлопрозорого покриття колектора $t_{СК}$ наприкінці першого проміжку часу (з використанням теплового балансу світлопрозорого покриття плоского колектора сонячної енергії (3.5)).

3.1. Визначається кількість сонячної енергії Q_C , що надходить до світлопрозорого покриття колектора за перший проміжок часу, та обчислюється за залежністю (3.2) кількість сонячної енергії Q_A , котра поглинається світлопрозорим покриттям колектора впродовж першого проміжку часу,

$$Q_A = A Q_C.$$

3.2. Обчислюється кількість теплоти $Q_{ПС}$, що передається за перший проміжок часу від повітря, котре рухається в колекторі сонячної енергії, до світлопрозорого покриття.

3.2.1. Розраховується швидкість руху повітря ω , м/с, в колекторі сонячної енергії за формулою

$$\omega = L / F_K, \quad (3.36)$$

де L – витрата повітря, м³/с;

F_K – площа поперечного перерізу колектора сонячної енергії, м².

3.2.2. Визначається коефіцієнт тепловіддачі α_C .

Методику обчислення цього коефіцієнта наведено в пункті 3.2.5.

3.2.3. Приймається попереднє значення середньої за перший проміжок часу температури світлопрозорого покриття колектора t_C .

Попереднє значення температури t_C доцільно прийняти таким, що дорівнює

$$t_C = 0,5 (t_{ПОВ} + t_{НС}), \quad (3.37)$$

де $t_{ПОВ}$ – середня за перший проміжок часу температура повітря в колекторі, °С;

$t_{НС}$ – температура навколишнього середовища, °С.

3.2.4. Визначається за формулою (3.8) кількість теплоти $Q_{ПС}$.

$$Q_{ПС} = \alpha_C (t_{ПОВ} - t_C) F_{СВ} \Delta\tau.$$

3.3. Обчислюється кількість теплоти $Q_{МСП}$, що надходить упродовж першого проміжку часу до світлопрозорого покриття внаслідок променевого теплообміну між металевою пластиною і цим покриттям.

3.3.1. Приймається попереднє значення температури металевої пластини колектора сонячної енергії наприкінці першого проміжку часу $t_{МК}$ та обчислюється за рівнянням (3.23) попереднє значення середньої за перший проміжок часу температури металевої пластини t_M .

$$t_M = 0,5 (t_{МП} + t_{МК}).$$

3.3.2. Визначається за формулою (3.25) кількість теплоти $Q_{МСП}$.

$$Q_{\text{МСП}} = \varepsilon_{\text{п}} c_0 \left[\left[\left(\frac{T_{\text{М}}}{100} \right) \right]^4 - \left[\left(\frac{T_{\text{С}}}{100} \right) \right]^4 \right] F_{\text{М}} \Delta \tau.$$

3.4. Обчислюється зміна тепловмісту світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії $Q_{\text{СК}}$ впродовж першого проміжку часу.

3.4.1. Розраховується попереднє значення температури світлопрозорого покриття колектора $t_{\text{СК}}$ наприкінці першого проміжку часу.

$$t_{\text{СК}} = 2t_{\text{С}} - t_{\text{СП}}, \quad (3.38)$$

де $t_{\text{СП}}$ – температура світлопрозорого покриття на початку першого проміжку часу, °С.

3.4.2. Розраховується за формулою (3.11) величина $Q_{\text{СК}}$.

$$Q_{\text{СК}} = c_{\text{С}} m_{\text{С}} (t_{\text{СК}} - t_{\text{СП}}).$$

3.5. Обчислюється кількість теплоти $Q_{\text{СГ}}$, $Q_{\text{СВ}}$, що втрачається впродовж першого проміжку часу в навколишнє середовище через горизонтально та вертикально розташовані конструкції світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії, Дж.

3.5.1. Розраховуються за формулами, наведеними в пункті 3.2.5, коефіцієнти тепловіддачі від зовнішніх поверхонь світлопрозорого покриття колектора до навколишнього середовища.

3.5.2. Обчислюється кількість теплоти $Q_{\text{СГ}}$, $Q_{\text{СВ}}$.

За умови відсутності вітру:

– кількість теплоти $Q_{\text{СГ}}$ розраховується за формулою (3.13)

$$Q_{\text{СГ}} = \alpha_{\text{СГ}} (t_{\text{С}} - t_{\text{НС}}) F_{\text{СЗГ}} \Delta \tau;$$

– кількість теплоти $Q_{\text{СВ}}$ розраховується за формулою (3.15)

$$Q_{\text{СВ}} = \alpha_{\text{СВ}} (t_{\text{С}} - t_{\text{НС}}) F_{\text{СЗВ}} \Delta \tau.$$

За умови наявності вітру кількість теплоти, що втрачається за перший проміжок часу в навколишнє середовище через горизонтально та вертикально розташовані конструкції світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії, розраховується за формулою (3.17)

$$Q_{\text{СГ}} + Q_{\text{СВ}} = \alpha_{\text{СЗ}} (t_{\text{С}} - t_{\text{НС}}) (F_{\text{СЗГ}} + F_{\text{СЗВ}}) \Delta \tau.$$

3.6. Визначається орієнтовне значення температури світлопрозорого покриття колектора $t_{СК}$ наприкінці першого проміжку часу.

Складається рівняння (3.5)

$$Q_A + Q_{ПС} + Q_{МСП} = Q_{СК} + Q_{СГ} + Q_{СВ}.$$

Якщо ліва частина рівняння (3.5) не дорівнює правій частині, то підбирається таке значення температури світлопрозорого покриття колектора $t_{СК}$ наприкінці першого проміжку часу, при якому б ліва частина цього рівняння дорівнювала його правій частині.

4. Обчислюється орієнтовне значення температури металевої пластини колектора сонячної енергії наприкінці першого проміжку часу $t_{МК}$ (з використанням сумісного теплового балансу металевої пластини та шару теплоізоляції).

4.1. Визначається за формулою (3.4) кількість сонячної енергії Q_D , що проходить крізь світлопрозоре покриття колектора впродовж першого проміжку часу:

$$Q_D = DQ_C.$$

4.2. Розраховується за формулою (3.20) зміна тепловмісту металевої пластини Q_M впродовж першого проміжку часу.

$$Q_M = c_M m_M (t_{МК} - t_{МП}).$$

4.3. Обчислюється за методикою, наведеною в пункті 3.2.4, кількість теплоти Q_T , що витрачається на нагрівання шару теплоізоляції колектора сонячної енергії впродовж першого проміжку часу.

4.4. Обчислюється орієнтовне значення температури металевої пластини колектора сонячної енергії наприкінці першого проміжку часу $t_{МК}$.

Ураховується, що для першого проміжку часу кількість теплоти, котра втрачається в навколишнє середовище через горизонтальну поверхню шару теплоізоляції, $Q_{ТГ} = 0$. Тоді рівняння (3.18) має вигляд

$$Q_D = Q_M + Q_{МП} + Q_{МСП} + Q_T.$$

Якщо ліва частина цього рівняння не дорівнює правій частині, то підбирається таке значення температури металевієї пластини колектора сонячної енергії наприкінці першого проміжку часу $t_{МК}$, при якому ліва частина цього рівняння дорівнювала б його правій частині.

5. Уточнюються: середня за перший проміжок часу температура повітря на виході з колектора сонячної енергії $t_{ПВ}$; температура світлопрозорого покриття колектора наприкінці першого проміжку часу $t_{СК}$; температура металевієї пластини колектора сонячної енергії наприкінці першого проміжку часу $t_{МК}$.

5.1. Розраховується за формулою (3.33) кількість теплоти Q_H , що надходить до колектора сонячної енергії з повітрям впродовж першого проміжку часу.

$$Q_H = c_{ПН} \rho_{ПН} L t_{ПН} \Delta\tau.$$

Густина повітря ρ_i , кг/м^3 , при довільній температурі t_i обчислюється за рівнянням

$$\rho_i = 353 / (273 + t_i). \quad (3.39)$$

5.2. Розраховується за формулою (3.34) кількість теплоти Q_B , що видаляється з колектора сонячної енергії з повітрям впродовж першого проміжку часу.

$$Q_B = c_{ПВ} \rho_{ПВ} L t_{ПВ} \Delta\tau.$$

5.3. Уточнюються температури $t_{СК}$, $t_{МК}$, $t_{ПВ}$.

Складається тепловий баланс колектора сонячної енергії для першого проміжку часу (3.31). Ураховується, що для першого проміжку часу $Q_{ТГ} = 0$.

$$Q_A + Q_D + Q_H = Q_B + Q_M + Q_{СК} + Q_{СГ} + Q_{СВ} + Q_T.$$

Якщо ліва частина цього рівняння не дорівнює правій частині, то розглядаються одночасно три теплові баланси:

– тепловий баланс світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії

$$Q_A + Q_{ПС} + Q_{МСП} = Q_{СК} + Q_{СГ} + Q_{СВ};$$

– сумісний тепловий баланс металевієї пластини та шару утеплювача колектора сонячної енергії

$$Q_D = Q_M + Q_{МП} + Q_{МСП} + Q_T;$$

– тепловий баланс колектора сонячної енергії для першого проміжку часу

$$Q_A + Q_D + Q_H = Q_B + Q_M + Q_{СК} + Q_{СГ} + Q_{СВ} + Q_T.$$

Методом ітерацій уточнюються: температура світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії наприкінці першого проміжку часу $t_{СК}$; температура металевієї пластини колектора наприкінці першого проміжку часу $t_{МК}$; середня за перший проміжок часу температура повітря на виході з колектора $t_{ПВ}$.

Підбираються такі значення температур $t_{СК}$, $t_{МК}$, $t_{ПВ}$, щоб у кожному з трьох вищевказаних рівнянь ліва частина дорівнювала правій частини.

6. Складаються для першого проміжку часу теплові баланси камери для теплової обробки гідроізольованих бетонних або залізобетонних виробів нагрітим повітрям та теплові баланси повітропроводів установки.

Після сумісного аналізу теплових балансів колектора сонячної енергії, теплової камери та повітропроводів остаточно уточнюються температури $t_{СК}$, $t_{МК}$, $t_{ПВ}$.

Відповідну систему рівнянь наведено в пункті 3.2.6.

7. Обчислюються для кожного з наступних проміжків часу температури $t_{СК}$, $t_{МК}$, $t_{ПВ}$. Розрахунки здійснюються за вищенаведеним алгоритмом.

Підсумки. Розроблено алгоритм обчислення інтенсивності нагрівання повітря в плоскому колекторі сонячної енергії власної конструкції, розрахункову схему якого зображено на рис. 3.1. Конструктивні зміни в плоскому колекторі сонячної енергії власної конструкції обумовлюють відповідні зміни в теплових балансах та в наведеному алгоритмі.

3.2. Математичні моделі процесів теплообміну при тепловій обробці бетонних і залізобетонних виробів нагрітим повітрям

3.2.1. Теоретичні передумови

При тепловій обробці в закритих формах бетонних та залізобетонних виробів нагрітим повітрям масообмін між виробами і повітрям відсутній.

Додатковим джерелом теплоти в камері є екзотермічні реакції взаємодії цементу з водою.

За наявності внутрішнього джерела теплоти у виробі диференціальне рівняння теплопровідності має вигляд

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{q_v}{c_p}, \quad (3.40)$$

де q_v – об'ємна густина внутрішнього джерела теплоти, Вт/м³;

a – коефіцієнт температуропровідності бетону (для залізобетону враховується наявність арматури), м²/с, який дорівнює

$$a = \frac{\lambda}{c_p}. \quad (3.41)$$

У прямокутній системі координат (x, y, z)

$$\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}. \quad (3.42)$$

При тепловій обробці в закритих формах бетонних та залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії або в повітрянагрівачі (рис. 2.1, 2.2), зміна температури цих виробів у зазначеному процесі заздалегідь невідома.

Оскільки інтенсивність тепловиділення цементу залежить за інших рівних факторів від температури бетону, а інтенсивність зміни температури бетону попередньо невідома, то в обчисленнях прийнято спрощення: тепловиділення цементу враховується не в диференціальному рівнянні теплопровідності, а в теплових балансах камери. Тоді використовується диференціальне рівняння теплопровідності

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t. \quad (3.43)$$

Температурне поле конструкцій, що огорожують камеру, в період теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів – нестационарне.

Прийнято, що температура конструкцій камери змінюється тільки в напрямку по нормалі до їх поверхонь. Тоді диференціальне рівняння теплопровідності має вигляд

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \quad (3.44)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності матеріалу конструкції, $\text{м}^2/\text{с}$.

Додаткові пояснення стосовно температурного поля конструкцій, що огорожують камеру, відображено в пункті 3.2.4.

Граничні умови третього роду наявні:

- на поверхнях виробів і форм (або на поверхнях гідроізолюваної системи);
- на внутрішніх поверхнях конструкцій, що огорожують камеру;
- на зовнішніх поверхнях прогрітих: надземних частин стінок камер (для заглиблених камер); стінок камер (для надземних камер); кришок камер;

Закон теплообміну має вигляд

$$q = \alpha_k (t_{c1} - t_{п}) + \alpha_{пр} (t_{c1} - t_{c2}), \quad (3.45)$$

де t_{c1} , t_{c2} – температури поверхонь теплообміну, $^{\circ}\text{C}$;

$t_{п}$ – температура повітря, $^{\circ}\text{C}$;

α_k – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$;

$\alpha_{пр}$ – коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$;

коефіцієнти тепловіддачі для розрахункових проміжків часу приймаються сталими;

при іншому напрямку теплового потоку здійснюється відповідне корегування наведеного рівняння.

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням $\alpha_{\text{пр}}$, Вт/(м²·°C), з урахуванням рекомендацій джерел [77, 162] дорівнює

$$\alpha_{\text{пр}} = \frac{\varepsilon_{\text{п}} c_0}{t_{\text{c1}} - t_{\text{c2}}} \left[\left(\frac{T_{\text{c1}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{c2}}}{100} \right)^4 \right]; \quad (3.46)$$

($\Delta t = \Delta T$).

Граничні умови четвертого роду наявні на зовнішніх поверхнях підземних частин стінок камери, на зовнішній поверхні днища камери, а також на межі шарів багат шарових конструкцій, що огорожують камеру (при відповідному прогріванні).

У досліджуваних умовах температура і густина теплового потоку на поверхні дотику двох тіл відповідно рівні:

$$\lambda_1 \left(\frac{\partial t_1}{\partial n} \right)_c = \lambda_2 \left(\frac{\partial t_2}{\partial n} \right)_c, \quad (3.47)$$

де $\partial t / \partial n$ – градієнт температури, °C/м.

Нижче наведено основні спрощення, які застосовуються при обчисленні температурного поля бетонних і залізобетонних виробів під час їх теплової обробки в закритих формах із використанням нагрітого повітря.

Перше спрощення: тепловиділення цементу враховується не в диференціальному рівнянні теплопровідності, а в теплових балансах камери (пояснення наведено в цьому пункті вище).

Друге спрощення: загальний термін, упродовж якого відбувається нагрівання виробів, розділяється на проміжки часу тривалістю $\Delta \tau$ (див. пункт 3.2.4). Для кожного проміжку часу приймаються сталими коефіцієнти тепловіддачі.

Третє спрощення: обчислення температурного поля може бути здійснено: плит та панелей – як необмежених пластин [151, 152, 161, 164, 283, 303]; балок (і т. ін.) – як нескінченних циліндрів [151, 152, 161].

Тоді для виробів, що мають форму пластини, застосовується диференціальне рівняння теплопровідності (3.44)

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2},$$

де a – коефіцієнт температуропровідності бетону (для залізобетону враховується наявність арматури), $\text{м}^2/\text{с}$.

Розв'язання вказаного диференціального рівняння теплопровідності (з урахуванням умов однозначності для необмеженої пластини) наведено, зокрема, в джерелах [77, 133, 135, 144, 152, 162, 259, 292, 311].

Оскільки наявність внутрішнього джерела теплоти (тепловиділення цементу при гідратації) враховується не в диференціальному рівнянні теплопровідності, а в теплових балансах камери, то при використанні відповідних формул відлік часу здійснюється не від початку процесу теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів, а окремо для кожного i -го проміжку часу.

Нижче відображено залежності для обчислення (з урахуванням рекомендацій вказаних джерел) кількості теплоти, яку сприймає (або втрачає в період термосного тверднення) виріб, що має форму пластини, впродовж i -го проміжку часу внаслідок конвективного теплообміну. Урахування променевого теплообміну відбувається з використанням окремої складової у відповідних теплових балансах.

Примітка. У наведених нижче формулах враховується п'яте спрощення. Досліджувана система: бетонний або залізобетонний виріб, форма, кришка або гідроізоляційний матеріал (використовується назва системи «бетонний (залізобетонний) виріб»).

Кількість теплоти, Дж, яку сприймає бетонний або залізобетонний виріб (котрий має форму пластини) впродовж і-го проміжку часу внаслідок конвективного теплообміну, розраховується за залежністю

$$Q = 2\delta F \rho c (\overline{t_{\text{ВПК}}} - t_{\text{ВПП}}), \quad (3.48)$$

де δ – напівтовщина бетонного (залізобетонного) виробу, м;

F – площа поверхні теплообміну м^2 ;

$\overline{t_{\text{ВПК}}}$ – середня температура виробу (що має форму пластини) наприкінці і-го проміжку часу (обумовлена конвективним теплообміном), $^{\circ}\text{C}$;

$t_{\text{ВПП}}$ – середня температура виробу на початку і-го проміжку часу, $^{\circ}\text{C}$; ця температура є середньою температурою виробу наприкінці попереднього проміжку часу; значення $t_{\text{ВПП}}$ обчислюється з використанням системи теплових балансів камери.

Середня температура виробу (що має форму пластини) наприкінці і-го проміжку часу (обумовлена конвективним теплообміном) у досліджуваному випадку дорівнює

$$\overline{t_{\text{ВПК}}} = t_{\text{П}} - \overline{\Theta_{\text{ВПК}}} (t_{\text{П}} - t_{\text{ВПП}}), \quad (3.49)$$

де $\overline{\Theta_{\text{ВПК}}}$ – середня безрозмірна температура виробу (що має форму пластини) наприкінці і-го проміжку часу (обумовлена конвективним теплообміном).

Середня безрозмірна температура виробу (що має форму пластини) наприкінці і-го проміжку часу (обумовлена конвективним теплообміном) у досліджуваному випадку обчислюється за формулою

$$\overline{\Theta_{\text{ВПК}}} = \frac{t_{\text{П}} - \overline{t_{\text{ВПК}}}}{t_{\text{П}} - t_{\text{ВПП}}} = \sum_{n=1}^{n \rightarrow \infty} \frac{2 \sin^2 \mu_n}{\mu_n^2 + \mu_n \sin \mu_n \cos \mu_n} \exp(-\mu_n^2 Fo); \quad (3.50)$$

якщо критерій Фур'є $Fo \geq 0,3$, то

$$\overline{\Theta}_{\text{ВПК}} = \frac{t_{\text{п}} - \overline{t_{\text{ВПК}}}}{t_{\text{п}} - t_{\text{ВПП}}} = \frac{2\sin^2\mu_1}{\mu_1^2 + \mu_1 \sin\mu_1 \cos\mu_1} \exp(-\mu_1^2 Fo), \quad (3.51)$$

де $t_{\text{п}}$ – середня за i -й проміжок часу температура повітря камери, $^{\circ}\text{C}$;

критерій Фур'є Fo обчислюється за формулою (2.1);

значення μ_1, \dots, μ_n залежно від критерію Bi (формула (2.2)) наведено, зокрема, в джерелах [77, 144, 259, 292].

Кількість теплоти, Дж, яку втрачає в період термосного тверднення бетонний або залізобетонний виріб (що має форму пластини) впродовж i -го проміжку часу внаслідок конвективного теплообміну, розраховується за формулою

$$Q = 2\delta F \rho c (t_{\text{ВПП}} - \overline{t_{\text{ВЛК}}}), \quad (3.52)$$

пояснення до складових рівняння наведено вище.

Середня температура виробу (який має форму пластини) наприкінці i -го проміжку часу $\overline{t_{\text{ВПК}}}$ (обумовлена конвективним теплообміном) у цьому випадку дорівнює

$$\overline{t_{\text{ВПК}}} = t_{\text{п}} + \overline{\Theta}_{\text{ВПК}} (t_{\text{ВПП}} - t_{\text{п}}). \quad (3.53)$$

Середня безрозмірна температура виробу (що має форму пластини) наприкінці i -го проміжку часу (обумовлена конвективним теплообміном) у цьому випадку обчислюється за формулою

$$\overline{\Theta}_{\text{ВПК}} = \frac{\overline{t_{\text{ВЛК}}} - t_{\text{п}}}{t_{\text{ВПП}} - t_{\text{п}}} = \sum_{n=1}^{n \rightarrow \infty} \frac{2\sin^2\mu_n}{\mu_n^2 + \mu_n \sin\mu_n \cos\mu_n} \exp(-\mu_n^2 Fo); \quad (3.54)$$

якщо критерій Фур'є $Fo \geq 0,3$, то

$$\overline{\Theta}_{\text{впк}} = \frac{\overline{t_{\text{влк}}} - t_{\text{п}}}{t_{\text{впп}} - t_{\text{п}}} = \frac{2\sin^2 \mu_1}{\mu_1^2 + \mu_1 \sin \mu_1 \cos \mu_1} \exp(-\mu_1^2 Fo); \quad (3.55)$$

пояснення до складових цих рівнянь наведено вище.

Четверте спрощення стосується використання залежностей для визначення кількості теплоти Q , Дж, яку сприймає матеріал від навколишнього середовища (або віддає в навколишнє середовище) за певний проміжок часу, наведених, зокрема, в джерелах [30, 181, 182, 263].

Нижче відображено залежності для обчислення (з урахуванням рекомендацій вказаних джерел) кількості теплоти, яку сприймає (або втрачає в період термосного тверднення) бетонний виріб упродовж i -го проміжку часу внаслідок конвективного теплообміну. Урахування променевого теплообміну відбувається з використанням окремої складової у відповідних теплових балансах.

Кількість теплоти, Дж, яку сприймає бетонний (залізобетонний) виріб унаслідок конвективного теплообміну впродовж i -го проміжку часу, можна визначити за формулою

$$Q = c m (t_{\text{п}} - t_{\text{вп}}) \beta_{\text{С}}, \quad (3.56)$$

де $t_{\text{п}}$ – середня за i -й проміжок часу температура повітря камери, °С;

$t_{\text{вп}}$ – середня температура виробу на початку i -го проміжку часу, °С;

$\beta_{\text{С}}$ – коефіцієнт, котрий враховує, яку частку теплоти сприймає бетонний (залізобетонний) виріб упродовж i -го проміжку часу внаслідок конвективного теплообміну відносно кількості теплоти, необхідної для нагрівання виробу до температури повітря $t_{\text{п}}$.

Кількість теплоти, Дж, яку втрачає бетонний (залізобетонний) виріб унаслідок конвективного теплообміну впродовж i -го проміжку часу, можна визначити за формулою

$$Q = c m (t_{\text{вп}} - t_{\text{п}}) \beta_{\text{В}}, \quad (3.57)$$

де β_B – коефіцієнт, котрий ураховує, яку частку теплоти віддає бетонний (залізобетонний) виріб упродовж i -го проміжку часу внаслідок конвективного теплообміну відносно кількості теплоти, необхідної для охолодження виробу до температури повітря.

Коефіцієнт β визначається за довідковими даними (які наведено, зокрема, в джерелах [30, 181, 182, 263]) за допомогою критерію Фур'є, котрий дорівнює

$$F_0 = \Delta\tau / c m R, \quad (3.58)$$

де $\Delta\tau$ – проміжок часу, с;

R – повний опір теплопередачі з усієї поверхні досліджуваної системи, °C/Вт.

Примітка. Розмірність величини R у формулі (3.58) відрізняється від розмірності опору теплопередачі R ($m^2 \cdot °C/Вт$) і обумовлюється формулою (3.59).

Величина R обчислюється за залежністю (яку відображено, зокрема, в джерелах [30, 181, 182, 263])

$$R = m / (\rho \lambda F^2) + 1 / (\alpha F), \quad (3.59)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, Вт/($m^2 \cdot °C$);

F – площа поверхні теплообміну, m^2 .

П'яте спрощення. Необхідність застосування цього спрощення обумовлена тим, що виріб нагрівається або охолоджується разом з формою та кришкою (або гідроізоляційним матеріалом).

Запропоновано:

– приймати середньозважені значення величин λ , c , ρ для досліджуваної системи;

– визначати середню температуру досліджуваної системи.

Шосте спрощення: обчислення теплообміну між поверхнями тверднучих у формах бетонних чи залізобетонних виробів і навколишнім середовищем здійснюється з урахуванням середньої температури цих виробів.

Підсумки:

1. Наведено диференціальні рівняння теплопровідності та граничні умови для процесів теплообміну при тепловій обробці в закритих формах бетонних та залізобетонних виробів із використанням нагрітого повітря.

2. Відображено основні спрощення, які застосовуються при обчисленні зміни температури бетонних та залізобетонних виробів під час їх теплової обробки в досліджуваних умовах.

3.2.2. Теплообмін у камері при тепловій обробці бетонних і залізобетонних виробів нагрітим повітрям (перший варіант гідроізоляції виробів)

Розглядається теплообмін у камері, призначеній для теплової обробки бетонних або залізобетонних виробів нагрітим повітрям за умови, що гідроізоляцію виробів за допомогою кришок чи гідроізоляційного матеріалу здійснено відповідно до схем-розгорток, відображених на рис. 2.3, 3.11. Переваги та недоліки цього варіанта гідроізоляції бетонних та залізобетонних виробів наведено в підрозділі 3.1.

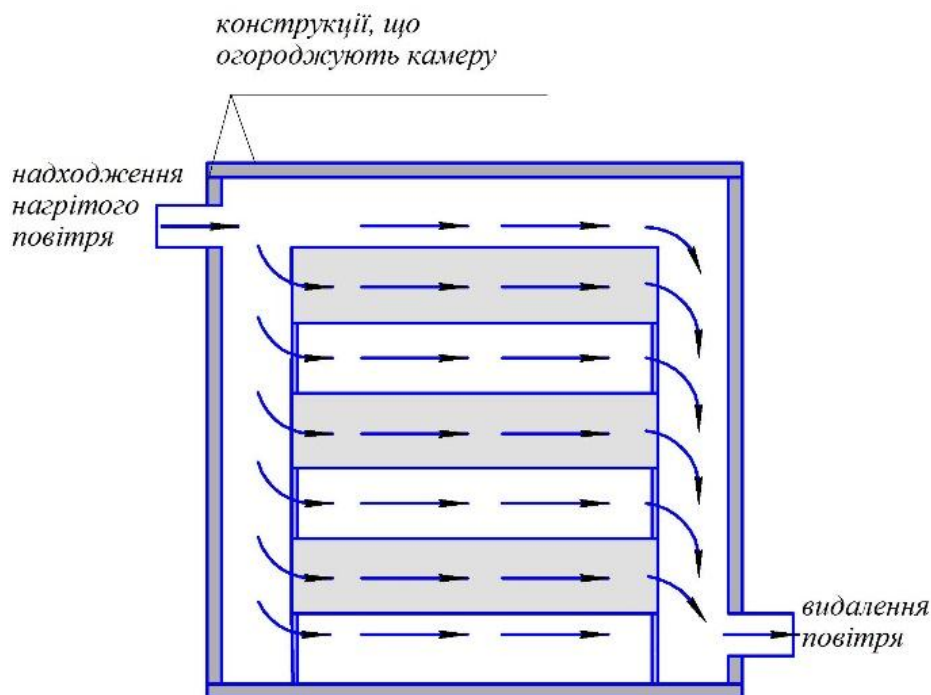


Рис. 3.11. Схема-розгортка першого варіанта гідроізоляції бетонних або залізобетонних виробів

Загальний термін, упродовж якого відбувається нагрівання виробів, розділяється на проміжки часу тривалістю Δt (рекомендації наведено в пункті 3.2.4). Для кожного з цих проміжків часу складаються відповідні теплові баланси.

На схемі-розгортці (рис. 3.12) відображено складові теплових балансів надземної камери в період теплової обробки нагрітим повітрям бетонних або залізобетонних виробів при першому варіанті їх гідроізоляції.

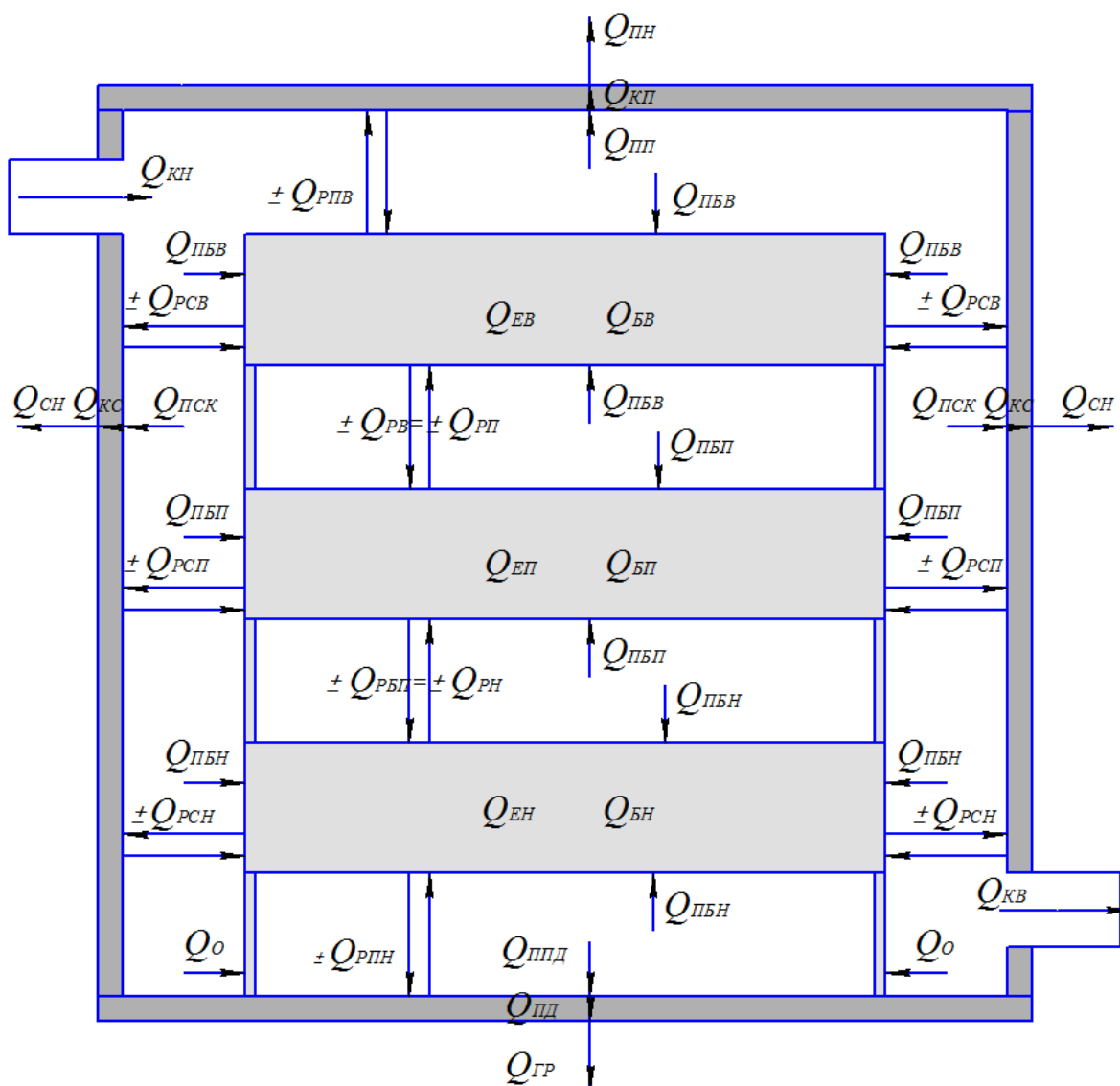


Рис. 3.12. Складові теплових балансів камери (перший варіант гідроізоляції бетонних або залізобетонних виробів):

$$|Q_{РП}| = |Q_{РВ}|; |Q_{РН}| = |Q_{РБП}|$$

При аналізі процесів теплообміну в камері необхідно зважати на те, що верхній і нижній вироби знаходяться в особливих умовах теплообміну з навколишнім середовищем.

Тепловий баланс надземної камери в період теплової обробки нагрітим повітрям бетонних або залізобетонних виробів (при першому варіанті їх гідроізоляції) для і-го проміжку часу має вигляд

$$Q_{KH} + Q_E = Q_{KB} + Q_{GB} + Q_{KS} + Q_{KP} + Q_{PD} + Q_{SN} + Q_{PN} + Q_{GP} + Q_O + Q_P, \quad (3.60)$$

де Q_{KH} – кількість теплоти, що надходить до камери з нагрітим повітрям упродовж і-го проміжку часу, Дж;

Q_E – надходження теплоти внаслідок наявності екзотермічних реакцій гідратації цементу впродовж і-го проміжку часу, Дж;

Q_{KB} – втрати теплоти впродовж і-го проміжку часу з повітрям, що видаляється з камери, Дж;

Q_{GB} – витрати теплоти на нагрівання бетонних або залізобетонних виробів, форм, кришок чи гідроізоляційного матеріалу впродовж і-го проміжку часу, Дж;

Q_{KS} – витрати теплоти на нагрівання стінок камери впродовж і-го проміжку часу, Дж;

Q_{KP} – витрати теплоти на нагрівання кришки камери впродовж і-го проміжку часу, Дж;

Q_{PD} – витрати теплоти на нагрівання підлоги (днища) камери впродовж і-го проміжку часу, Дж;

Q_{SN} – втрати теплоти в навколишнє середовище крізь стінки камери впродовж і-го проміжку часу, Дж (за умови наявності цих втрат теплоти в і-й проміжок часу);

Q_{PN} – втрати теплоти в навколишнє середовище крізь кришку камери впродовж і-го проміжку часу, Дж (за умови наявності цих втрат теплоти в і-й проміжок часу);

$Q_{ГР}$ – витрати теплоти на нагрівання ґрунту впродовж і-го проміжку часу, Дж (за умови наявності цих втрат теплоти в і-й проміжок часу);

Q_{O} – витрати теплоти впродовж і-го проміжку часу на нагрівання обладнання, на яке опираються форми, Дж;

$Q_{П}$ – витрати теплоти впродовж і-го проміжку часу на нагрівання повітропроводів, розміщених у камері (за умови їх наявності), Дж.

Тепловий баланс заглибленої камери в період теплової обробки нагрітим повітрям бетонних або залізобетонних виробів (при першому варіанті їх гідроізоляції) для і-го проміжку часу має вигляд

$$Q_{KH} + Q_E = Q_{KB} + Q_{ГБ} + Q_{КСН} + Q_{КСЗ} + Q_{КП} + Q_{ПД} + Q_{СН} + Q_{ПН} + Q_{ГРС} + Q_{ГРП} + Q_O + Q_{П}, \quad (3.61)$$

де $Q_{КСН}$, $Q_{КСЗ}$ – витрати теплоти впродовж і-го проміжку часу на нагрівання відповідно надземної та заглибленої частин стінок камери, Дж;

$Q_{СН}$ – втрати теплоти впродовж і-го проміжку часу в навколишнє середовище крізь надземні частини стінок камери, Дж (за умови наявності цих втрат в і-й проміжок часу);

$Q_{ГРС}$, $Q_{ГРП}$ – витрати теплоти впродовж і-го проміжку часу на нагрівання ґрунту відповідно в межах заглибленої частини стінок камери та в межах підлоги (днища) камери, Дж (за умови наявності цих втрат теплоти в і-й проміжок часу);

пояснення до інших складових цього рівняння відображено в поясненнях до рівняння (3.60).

Кількість теплоти Q_{KH} , що надходить до камери часу з нагрітим повітрям упродовж і-го проміжку, Дж, обчислюється за залежністю

$$Q_{KH} = c_{ПП} \rho_{ПП} L t_{ПП} \Delta t, \quad (3.62)$$

де $t_{ПП}$ – середня за і-й проміжок часу температура, з якою повітря надходить до камери, °С;

L – витрата повітря, м³/с.

Втрати теплоти $Q_{кв}$ упродовж i -го проміжку часу з повітрям, що видаляється з камери, Дж, визначаються за залежністю

$$Q_{кв} = c_{пк} \rho_{пк} L t_{пк} \Delta t, \quad (3.63)$$

де $t_{пк}$ – середня за i -й проміжок часу температура, з якою повітря видаляється з камери, °С.

Витрати теплоти $Q_{гь}$, Дж, дорівнюють

$$Q_{гь} = Q_{бв} + \Sigma Q_{бп} + Q_{бн}, \quad (3.64)$$

де $Q_{бв}$, $Q_{бп}$, $Q_{бн}$ – витрати теплоти на нагрівання відповідно верхнього, проміжних і нижнього бетонних або залізобетонних виробів, їх форм та кришок чи гідроізоляційного матеріалу впродовж i -го проміжку часу, Дж.

Витрати теплоти $Q_{бв}$, Дж, дорівнюють

$$Q_{бв} = Q_{бтв} + Q_{мв} + Q_{гв}, \quad (3.65)$$

де $Q_{бтв}$, $Q_{мв}$, $Q_{гв}$ – витрати теплоти впродовж i -го проміжку часу на нагрівання відповідно верхнього бетонного або залізобетонного виробу, форми, кришки чи гідроізоляційного матеріалу, Дж.

Витрати теплоти $Q_{бтв}$, $Q_{мв}$, $Q_{гв}$ дорівнюють

$$Q_{бтв} = c_{б} m_{бв} (t_{вк} - t_{вп}); \quad (3.66)$$

$$Q_{мв} = c_{м} m_{мв} (t_{мвк} - t_{мвп}); \quad (3.67)$$

$$Q_{гв} = c_{гм} m_{гмв} (t_{гвк} - t_{гвп}), \quad (3.68)$$

де $c_{б}$, $c_{м}$, $c_{гм}$ – питома масова теплоємність відповідно бетону, матеріалу форми, матеріалу кришки або гідроізоляційного матеріалу, Дж/(кг·°С); для залізобетонного виробу враховується наявність арматури;

$m_{БВ}$, $m_{МВ}$, $m_{ГМВ}$ – маса відповідно верхнього виробу, форми, кришки чи гідроізоляційного матеріалу, кг;

$t_{ВП}$, $t_{ВК}$ – температура верхнього виробу відповідно на початку та наприкінці і-го проміжку часу, °С;

$t_{МВП}$, $t_{МВК}$ – температура форми верхнього виробу відповідно на початку та наприкінці і-го проміжку часу, °С;

$t_{ГВП}$, $t_{ГВК}$ – температура кришки або гідроізоляційного матеріалу верхнього виробу відповідно на початку та наприкінці і-го проміжку часу, °С.

Витрати теплоти $Q_{БВ}$ впродовж і-го проміжку часу на нагрівання верхнього бетонного або залізобетонного виробу, форми, кришки чи гідроізоляційного матеріалу можна визначити з урахуванням п'ятого спрощення, наведеного в пункті 3.2.1,

$$Q_{БВ} = c_{БВ} m_{СБВ} (t_{БВК} - t_{БВП}), \quad (3.69)$$

де $c_{БВ}$ – середня (середньозважена) питома масова теплоємність бетону, матеріалу форми, матеріалу кришки або гідроізоляційного матеріалу, Дж/(кг·°С); для залізобетонного виробу враховується наявність арматури;

$m_{СБВ}$ – маса верхнього виробу, форми, кришки чи гідроізоляційного матеріалу, кг;

$t_{БВП}$, $t_{БВК}$ – середня температура верхнього виробу, форми, кришки або гідроізоляційного матеріалу відповідно на початку та наприкінці і-го проміжку часу, °С.

Тепловий баланс верхнього гідроізолюваного бетонного або залізобетонного виробу для і-го проміжку часу має вигляд

$$Q_{БВ} = Q_{ПБВ} + Q_{ЕВ} \pm Q_{РСВ} \pm Q_{РПВ} \pm Q_{РВ}, \quad (3.70)$$

$$\text{або} \quad Q_{БТВ} + Q_{МВ} + Q_{ГВ} = Q_{ПБВ} + Q_{ЕВ} \pm Q_{РСВ} \pm Q_{РПВ} \pm Q_{РВ}, \quad (3.71)$$

$$\text{або} \quad c_{БВ} m_{СБВ} (t_{БВК} - t_{БВП}) = Q_{ПБВ} + Q_{ЕВ} \pm Q_{РСВ} \pm Q_{РПВ} \pm Q_{РВ}, \quad (3.72)$$

де $Q_{\text{ПБВ}}$ – кількість теплоти, яку сприймають від нагрітого повітря впродовж i -го проміжку часу верхній бетонний (залізобетонний) виріб, форма, кришка або гідроізоляційний матеріал, Дж;

$Q_{\text{ЕВ}}$ – надходження теплоти внаслідок наявності екзотермічних реакцій гідратації цементу у верхньому бетонному (залізобетонному) виробі впродовж i -го проміжку часу, Дж;

$Q_{\text{РСВ}}$ – кількість теплоти, що передається внаслідок наявності результуючого випромінювання від вертикальних поверхонь форми верхнього виробу до відповідних внутрішніх поверхонь стінок камери (або у зворотному напрямку) впродовж i -го проміжку часу, Дж;

$Q_{\text{РПВ}}$ – кількість теплоти, що передається внаслідок наявності результуючого випромінювання від гідроізолюваної поверхні верхнього виробу до внутрішньої поверхні кришки камери (або у зворотному напрямку) впродовж i -го проміжку часу, Дж;

$Q_{\text{РВ}}$ – кількість теплоти, яку сприймає днище верхньої форми від гідроізолюваної поверхні проміжного виробу внаслідок наявності результуючого випромінювання впродовж i -го проміжку часу, Дж (цей тепловий потік може бути спрямований у зворотному напрямку).

Кількість теплоти $Q_{\text{ПБВ}}$, Дж, дорівнює

$$Q_{\text{ПБВ}} = Q_{\text{ПБВБ}} + Q_{\text{ПБВМ}} + Q_{\text{ПБВГ}}, \quad (3.73)$$

де $Q_{\text{ПБВБ}}$, $Q_{\text{ПБВМ}}$, $Q_{\text{ПБВГ}}$ – кількість теплоти, яку сприймає від нагрітого повітря впродовж i -го проміжку часу відповідно бетонний (залізобетонний) виріб, форма, кришка або гідроізоляційний матеріал, Дж.

Кількість теплоти $Q_{\text{ПБВ}}$ для виробу, що має форму пластини, можна обчислити з урахуванням третього та п'ятого спрощень, які наведено в пункті 3.2.1, за формулою

$$Q_{\text{ПБВ}} = 2\delta F_{\text{БВ}} \rho_{\text{БВ}} c_{\text{БВ}} (\overline{t_{\text{ВК}}} - t_{\text{БВП}}), \quad (3.74)$$

де $\rho_{БВ}$ – середня (середньозважена) густина бетону, матеріалу форми, матеріалу кришки або гідроізоляційного матеріалу, кг/м^3 ; для залізобетонного виробу враховується наявність арматури;

$\overline{t_{ВК}}$ – середня температура верхнього бетонного (залізобетонного) виробу, форми та кришки або гідроізоляційного матеріалу наприкінці i -го проміжку часу, обумовлена теплообміном з нагрітим повітрям, $^{\circ}\text{C}$.

Кількість теплоти $Q_{ПБВ}$ можна обчислити з урахуванням четвертого й п'ятого спрощень, які наведено в пункті 3.2.1, за формулою

$$Q_{ПБВ} = c_{БВ} m_{СБВ} (t_{П} - t_{БВП}) \beta_{СВ}, \quad (3.75)$$

де $t_{П}$ – середня за i -й проміжок часу температура повітря в камері, $^{\circ}\text{C}$;

$\beta_{СВ}$ – коефіцієнт, котрий ураховує, яку частку теплоти сприймає верхній бетонний (залізобетонний) виріб, форма та кришка або гідроізоляційний матеріал упродовж i -го проміжку часу внаслідок конвективного теплообміну (відносно кількості теплоти, необхідної для нагрівання цієї системи до температури $t_{П}$); коефіцієнт $\beta_{СВ}$ визначається за довідковими даними (див. пункт 3.2.1) за допомогою критерію Фур'є, який дорівнює

$$F_0 = \Delta\tau / c_{БВ} m_{СБВ} R_{БВ}; \quad (3.76)$$

$$R_{БВ} = m_{СБВ} / (\rho_{БВ} \lambda_{БВ} F_{БВ}^2) + 1 / (\alpha F_{БВ}), \quad (3.77)$$

де $F_{БВ}$ – площа поверхні теплообміну верхнього гідроізольованого бетонного (залізобетонного) виробу, м^2 ;

$\lambda_{БВ}$ – середній (середньозважений) коефіцієнт теплопровідності бетону, матеріалу форми, матеріалу кришки або гідроізоляційного матеріалу, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$; для залізобетонного виробу враховується наявність арматури.

Кількість теплоти, Дж, яку втрачає впродовж і-го проміжку часу досліджувана система внаслідок наявності променевого теплообміну, можна обчислити за формулою (наведеною, зокрема, в книгах [77, 162])

$$Q_p = \varepsilon_n c_0 \left[\left(\frac{T_{c1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{c2}}{100} \right)^4 \right] F_1 \Delta\tau, \quad (3.78)$$

де c_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, Вт/(м² · К⁴);

T_{c1}, T_{c2} – температури поверхонь теплообміну, м²; ($\Delta t = \Delta T$);

$\Delta\tau$ – проміжок часу, с;

ε_n – приведена ступінь чорноти, яка обчислюється за формулою

$$\varepsilon_n = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}, \quad (3.79)$$

де F_1, F_2 – площі поверхонь теплообміну, м².

Теплові баланси проміжних та нижнього гідроізолюваних бетонних або залізобетонних виробів складаються аналогічно до вищенаведених теплових балансів. Ураховується (див. рис. 3.12), що:

$Q_{\text{БП}}$ – витрати теплоти на нагрівання впродовж і-го проміжку часу проміжного бетонного (залізобетонного) виробу, форми, кришки або гідроізоляційного матеріалу, Дж;

$Q_{\text{ПБП}}$ – кількість теплоти, яку сприймають від нагрітого повітря впродовж і-го проміжку часу проміжний бетонний (залізобетонний) виріб, форма, кришка чи гідроізоляційний матеріал, Дж;

$Q_{\text{ЕП}}$ – теплонадходження внаслідок наявності екзотермічних реакцій гідратації цементу в проміжному бетонному (залізобетонному) виробі впродовж і-го проміжку часу, Дж;

$Q_{РСП}$ – кількість теплоти, Дж, що передається внаслідок наявності результуючого випромінювання від вертикальних поверхонь проміжної форми до відповідних поверхонь стінок камери (або у зворотному напрямку) впродовж і-го проміжку часу;

$Q_{РП}$ – кількість теплоти, Дж, що передається внаслідок наявності результуючого випромінювання від гідроізолюваної поверхні проміжного виробу до днища форми розташованого вище виробу (або в зворотному напрямку) впродовж і-го проміжку часу; на рис. 3.12 $|Q_{РП}| = |Q_{РВ}|$;

$Q_{РБП}$ – кількість теплоти, Дж, що передається внаслідок наявності результуючого випромінювання від днища форми проміжного виробу до гідроізолюваної поверхні розташованого нижче виробу (або у зворотному напрямку) впродовж і-го проміжку часу; на рис. 3.12 $|Q_{РБП}| = |Q_{РН}|$;

$Q_{БН}$ – витрати теплоти на нагрівання впродовж і-го проміжку часу нижнього бетонного (залізобетонного) виробу, форми, кришки чи гідроізоляційного матеріалу, Дж;

$Q_{ПБН}$ – кількість теплоти, яку сприймають від нагрітого повітря впродовж і-го проміжку часу нижній бетонний (залізобетонний) виріб, форма, кришка чи гідроізоляційний матеріал, Дж;

$Q_{ЕН}$ – надходження теплоти внаслідок наявності екзотермічних реакцій гідратації цементу в нижньому бетонному (залізобетонному) виробі впродовж і-го проміжку часу, Дж;

$Q_{РСН}$ – кількість теплоти, Дж, що передається внаслідок наявності результуючого випромінювання від вертикальних поверхонь нижньої форми до відповідних поверхонь стінок камери (або у зворотному напрямку) впродовж і-го проміжку часу;

$Q_{РН}$ – кількість теплоти, Дж, яку сприймає гідроізолювана поверхня нижнього виробу від днища форми розташованого вище виробу впродовж і-го проміжку часу (цей тепловий потік може бути спрямований у зворотному напрямку); на рис. 3.12 $|Q_{РН}| = |Q_{РБП}|$;

$Q_{рпн}$ – кількість теплоти, Дж, що передається внаслідок наявності результуючого випромінювання від днища форми нижнього виробу до поверхні днища камери (або у зворотному напрямку) впродовж і-го проміжку часу.

Підсумки:

1. Розроблено теплові баланси камер для періоду теплової обробки в бетонних та залізобетонних виробів нагрітим повітрям (при першому варіанті гідроізоляції цих виробів).

2. Якщо камера для теплової обробки бетонних або залізобетонних виробів нагрітим повітрям розташована в блоці камер, то це потрібно враховувати при складанні теплових балансів досліджуваної камери та інших камер блоку (див. [114]).

3. Верхній та нижній вироби знаходяться в особливих умовах теплообміну з навколишнім середовищем. Доцільність урахування вказаного фактора при складанні теплових балансів аналізується окремо для кожного випадку.

4. Розроблено тепловий баланс верхнього гідроізольованого бетонного (залізобетонного) виробу для періоду теплової обробки нагрітим повітрям. Теплові баланси проміжних та нижнього виробів складаються аналогічно.

Теплові баланси, в яких не враховано різницю між температурами тверднучих виробів, наведено в пункті 3.2.6.

3.2.3. Теплообмін у камері при тепловій обробці бетонних і залізобетонних виробів нагрітим повітрям (другий та третій варіанти гідроізоляції виробів)

Розглядається теплообмін у камері, призначеній для теплової обробки бетонних або залізобетонних виробів повітрям, нагрітим у колекторі сонячної енергії або в повітронагрівачі, при другому варіанті гідроізоляції цих виробів (2.4, 3.13). Переваги та недоліки другого варіанта гідроізоляції бетонних та залізобетонних виробів наведено в підрозділі 2.1.

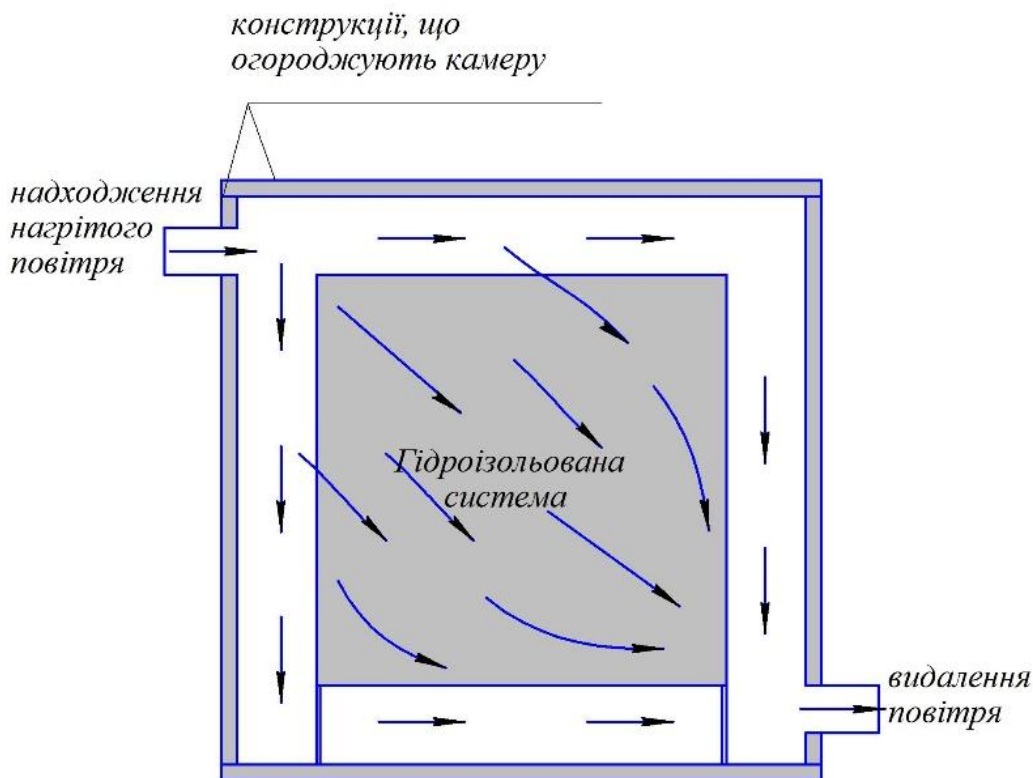


Рис. 3.13. Схема другого варіанта гідроізоляції бетонних або залізобетонних виробів

При нагріванні бетонних (залізобетонних) виробів відбувається випаровування вологи з їх поверхонь. Ця волога залишається в межах гідроізольованої системи.

Прийнято спрощення:

- нехтують впливом процесів масообміну в гідроізольованій системі на відповідні процеси теплообміну;
- повітряні прошарки в гідроізольованій системі невеликі, тому їх впливом на процеси теплообміну в камері нехтують.

За необхідності врахування вказаних факторів потрібно здійснювати моделювання теплової обробки виробів у лабораторній установці.

При обчисленні процесів теплообміну в камері загальний термін, упродовж якого відбувається нагрівання виробів, розділяється на проміжки часу тривалістю Δt (рекомендації наведено в пункті 3.2.4). Для цих проміжків часу складаються теплові баланси камери.

Мета складання теплових балансів камери: визначення зміни температури складових гідроізольованої системи та зміни температури повітря в камері.

Тепловий баланс надземної камери в період теплової обробки нагрітим повітрям бетонних або залізобетонних виробів (при другому варіанті їх гідроізоляції) для i -го проміжку часу має вигляд

$$Q_{KH} + Q_E = Q_{KB} + Q_G + Q_{KC} + Q_{KP} + Q_{PD} + Q_{CH} + Q_{PH} + Q_{GP} + Q_O + Q_P, \quad (3.78)$$

де Q_G – витрати теплоти на нагрівання складових гідроізольованої системи впродовж i -го проміжку часу, Дж;

пояснення до інших складових цього рівняння відображено в поясненнях до рівняння (3.60).

На рис. 3.14 схематично відображено складові теплових балансів надземної камери для другого варіанта гідроізоляції бетонних або залізобетонних виробів.

Тепловий баланс заглибленої камери для теплової обробки бетонних або залізобетонних виробів нагрітим повітрям для i -го проміжку часу складається аналогічно до теплового балансу (3.61).

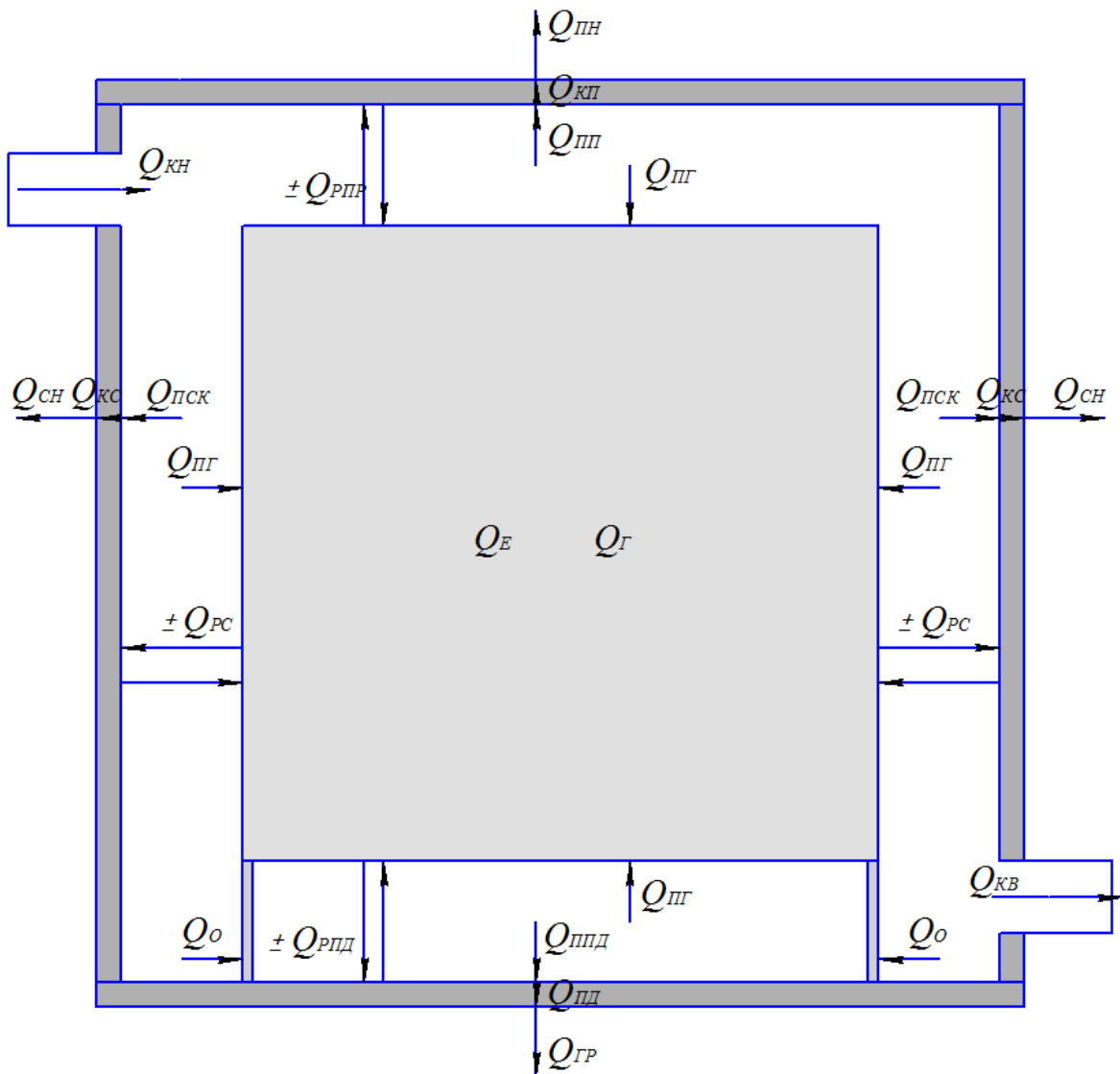


Рис. 3.14. Схематичне відображення складових теплових балансів камери (другий варіант гідроізоляції бетонних або залізобетонних виробів)

Витрати теплоти Q_{Γ} дорівнюють

$$Q_{\Gamma} = Q_{\text{Б}} + Q_{\text{М}} + Q_{\text{ГМ}}, \quad (3.79)$$

де $Q_{\text{Б}}$, $Q_{\text{М}}$, $Q_{\text{ГМ}}$ – витрати теплоти на нагрівання бетонних (залізобетонних) виробів, металевих форм та металевого устаткування, гідроізоляційного матеріалу (або відповідної конструкції) впродовж і-го проміжку часу, Дж;

якщо форми та устаткування виконано з різних матеріалів, то цей фактор відповідно враховується в обчисленнях.

Значення Q_{Γ} можна обчислити з урахуванням п'ятого спрощення (пункт 3.2.1). Тоді

$$Q_{\Gamma} = c_{\Gamma} m_{\Gamma} (t_{\Gamma K} - t_{\Gamma П}), \quad (3.80)$$

де m_{Γ} – маса складових гідроізолюваної системи, кг;

$t_{\Gamma П}$, $t_{\Gamma K}$ – середня температура складових гідроізолюваної системи відповідно на початку та наприкінці і-го проміжку часу, °С.

Тепловий баланс гідроізолюваної системи для і-го проміжку часу має вигляд

$$c_{\Gamma} m_{\Gamma} (t_{\Gamma K} - t_{\Gamma П}) = Q_{\Pi\Gamma} + Q_E \pm Q_{PC} \pm Q_{PP} \pm Q_{PD}, \quad (3.81)$$

де $Q_{\Pi\Gamma}$ – кількість теплоти, яку сприймає гідроізолювана система від нагрітого повітря впродовж і-го проміжку часу, Дж;

Q_E – надходження теплоти впродовж і-го проміжку часу внаслідок наявності екзотермічних реакцій гідратації цементу, Дж;

Q_{PC} – кількість теплоти, що передається внаслідок наявності результуючого випромінювання від вертикальних поверхонь гідроізолюваної системи до внутрішніх поверхонь стінок камери (або у зворотному напрямку) впродовж і-го проміжку часу, Дж;

Q_{PP} – кількість теплоти, що передається внаслідок наявності результуючого випромінювання від оберненої вгору горизонтальної поверхні гідроізолюваної системи до внутрішньої поверхні кришки камери (або в зворотному напрямку) впродовж і-го проміжку часу, Дж;

Q_{PD} – кількість теплоти, що передається внаслідок наявності результуючого випромінювання від оберненої вниз горизонтальної поверхні гідроізолюваної системи до днища камери (або у зворотному напрямку) впродовж і-го проміжку часу, Дж.

Кількість теплоти $Q_{\Pi\Gamma}$, Дж, дорівнює

$$Q_{\Pi\Gamma} = Q_{\Pi\Gamma B} + Q_{\Pi\Gamma M} + Q_{\Pi\Gamma T}, \quad (3.82)$$

де $Q_{\Pi\Gamma B}$, $Q_{\Pi\Gamma M}$, $Q_{\Pi\Gamma T}$ – кількість теплоти, Дж, яку сприймають від нагрітого повітря бетонні (залізобетонні) вироби, форми та устаткування, гідроізоляційний матеріал (або відповідна конструкція).

Обчислення величини $Q_{\text{ПГ}}$ може бути здійснено з урахуванням четвертого та п'ятого спрощень (пункт 3.2.1). Тоді

$$Q_{\text{ПГ}} = c_{\Gamma} m_{\Gamma} (t_{\text{П}} - t_{\text{ГП}}) \beta_{\Gamma}, \quad (3.83)$$

де $t_{\text{П}}$ – середня за i -й проміжок часу температура повітря в камері, °С;

$t_{\text{ГП}}$ – середня температура гідроізольованої системи на початку i -го проміжку часу, °С;

β_{Γ} – коефіцієнт, котрий урахує, яку частку теплоти сприймає гідроізольована система впродовж i -го проміжку часу від повітря (відносно кількості теплоти, необхідної для нагрівання системи до температури $t_{\text{П}}$); коефіцієнт β_{Γ} визначається за довідковими даними (див. пункт 3.2.1) за допомогою критерію Фур'є.

Критерій Фур'є обчислюється за залежністю

$$F_0 = \Delta\tau / c_{\Gamma} m_{\Gamma} R_{\Gamma}; \quad (3.84)$$

$$R_{\Gamma} = m_{\Gamma} / (\rho_{\Gamma} \lambda_{\Gamma} F_{\Gamma}^2) + 1 / (\alpha F_{\Gamma}), \quad (3.85)$$

де F_{Γ} – площа поверхонь гідроізольованої системи, м^2 ;

α – коефіцієнт тепловіддачі від нагрітого повітря до поверхонь теплообміну, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$.

Величини c_{Γ} , ρ_{Γ} і λ_{Γ} дорівнюють:

$$c_{\Gamma} = (c_{\text{Б}}m_{\text{Б}} + c_{\text{М}}m_{\text{М}} + c_{\text{ГМ}}m_{\text{ГМ}}) / m_{\Gamma}; \quad (3.86)$$

$$\lambda_{\Gamma} = (\lambda_{\text{Б}}m_{\text{Б}} + \lambda_{\text{М}}m_{\text{М}} + m_{\text{ГМ}}\lambda_{\text{ГМ}}) / m_{\Gamma}; \quad (3.87)$$

$$\rho_{\Gamma} = (\rho_{\text{Б}}m_{\text{Б}} + \rho_{\text{М}}m_{\text{М}} + m_{\text{ГМ}}\rho_{\text{ГМ}}) / m_{\Gamma}, \quad (3.88)$$

де c_{Γ} , ρ_{Γ} , λ_{Γ} – відповідно середня питома масова теплоємність, середня густина та середній коефіцієнт теплопровідності матеріалів гідроізольованої системи;

$c_B, c_M, c_{ГМ}$ – питома масова теплоємність відповідно бетону, металу форм та устаткування, гідроізоляційного матеріалу, Дж/(кг·°C); для залізобетонних виробів враховується наявність арматури;

$\lambda_B, \lambda_M, \lambda_{ГМ}$ – коефіцієнт теплопровідності відповідно бетону, металу форм та устаткування, гідроізоляційного матеріалу або матеріалу кришки, Вт/(м·°C); для залізобетонних виробів враховується наявність арматури;

$\rho_B, \rho_M, \rho_{ГМ}$ – густина відповідно бетону, металу форм та устаткування, гідроізоляційного матеріалу або матеріалу кришки, кг/м³; для залізобетонних виробів враховується наявність арматури;

$m_{Г}$ – маса гідроізолюваної системи $m_{Г}$, кг;

якщо форми та устаткування виконано з різних матеріалів, то цей фактор відповідно враховується в обчисленнях.

Розглядаються теплові баланси конструкцій, що огорожують камеру.

Витрати теплоти на нагрівання стінок камери $Q_{КС}$, кришки камери $Q_{КП}$ і днища камери $Q_{ПД}$ впродовж i -го проміжку часу обчислюються за залежностями, які наведено в пункті 3.2.4. Основою для використання цих залежностей є теплові баланси конструкцій, що огорожують камеру.

Тепловий баланс стінок камери для i -го проміжку часу має вигляд

$$Q_{ПСК} \pm Q_{РС} = Q_{КС} + Q_{СН}, \quad (3.89)$$

де $Q_{ПСК}$ – кількість теплоти, що передається від нагрітого повітря до стінок камери впродовж i -го проміжку часу, Дж;

$Q_{КС}$ – витрати теплоти на нагрівання стінок камери впродовж i -го проміжку часу, Дж;

$Q_{СН}$ – втрати теплоти в навколишнє середовище крізь стінки камери впродовж i -го проміжку часу, Дж (за умови наявності цих втрат в i -й проміжок часу).

Тепловий баланс кришки камери для i -го проміжку часу має вигляд

$$Q_{\text{ПП}} \pm Q_{\text{РПР}} = Q_{\text{КП}} + Q_{\text{ПН}}, \quad (3.90)$$

де $Q_{\text{ПП}}$ – кількість теплоти, що передається від нагрітого повітря до кришки камери впродовж i -го проміжку часу, Дж;

$Q_{\text{КП}}$ – витрати теплоти на нагрівання кришки камери впродовж i -го проміжку часу, Дж;

$Q_{\text{ПН}}$ – втрати теплоти в навколишнє середовище крізь кришку камери впродовж i -го проміжку часу, Дж.

Тепловий баланс підлоги (днища) камери для i -го проміжку часу має вигляд

$$Q_{\text{ППД}} \pm Q_{\text{РПД}} = Q_{\text{ПД}} + Q_{\text{ГР}}, \quad (3.91)$$

де $Q_{\text{ППД}}$ – кількість теплоти, що передається від нагрітого повітря до підлоги (днища) камери впродовж i -го проміжку часу, Дж;

$Q_{\text{ПД}}$ – витрати теплоти на нагрівання підлоги (днища) камери впродовж i -го проміжку часу, Дж;

$Q_{\text{ГР}}$ – витрати теплоти на нагрівання ґрунту впродовж i -го проміжку часу, Дж (за умови наявності цих втрат в i -й проміжок часу проміжок часу).

Втрати теплоти в навколишнє середовище крізь стінки камери впродовж i -го проміжку часу, Дж, обчислюються за формулою

$$Q_{\text{СН}} = \alpha_{\text{СН}} (t_{\text{СЗ}} - t_{\text{НС}}) F_{\text{СЗ}} \Delta\tau, \quad (3.92)$$

де $\alpha_{\text{СН}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішніх поверхонь стінок камери до навколишнього середовища, Вт/(м²·°С);

$t_{\text{СЗ}}$ – середня за вибраний проміжок часу температура зовнішньої поверхні стін камери, °С;

$t_{\text{НС}}$ – температура навколишнього середовища, °С.

Втрати теплоти в навколишнє середовище крізь кришку камери впродовж i -го проміжку часу, Дж, обчислюються за формулою

$$Q_{\text{ПН}} = \alpha_{\text{ПН}} (t_{\text{ПЗ}} - t_{\text{НС}}) F_{\text{ПЗ}} \Delta\tau, \quad (3.93)$$

де $\alpha_{\text{ПН}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні кришки камери до навколишнього середовища, Вт/(м²·°С);

$t_{\text{ПЗ}}$ – середня за вибраний проміжок часу температура зовнішньої поверхні кришки камери, °С.

Розглядається теплообмін в камері для теплової обробки бетонних або залізобетонних виробів нагрітим повітрям при третьому варіанті їх гідроізоляції (рис. 2.5, 3.15). Переваги та недоліки цього варіанта гідроізоляції вказаних виробів наведено в підрозділі 2.1. Основні положення відповідних обчислень аналогічні другому варіантові гідроізоляції бетонних або залізобетонних виробів з певним корегуванням теплових балансів.

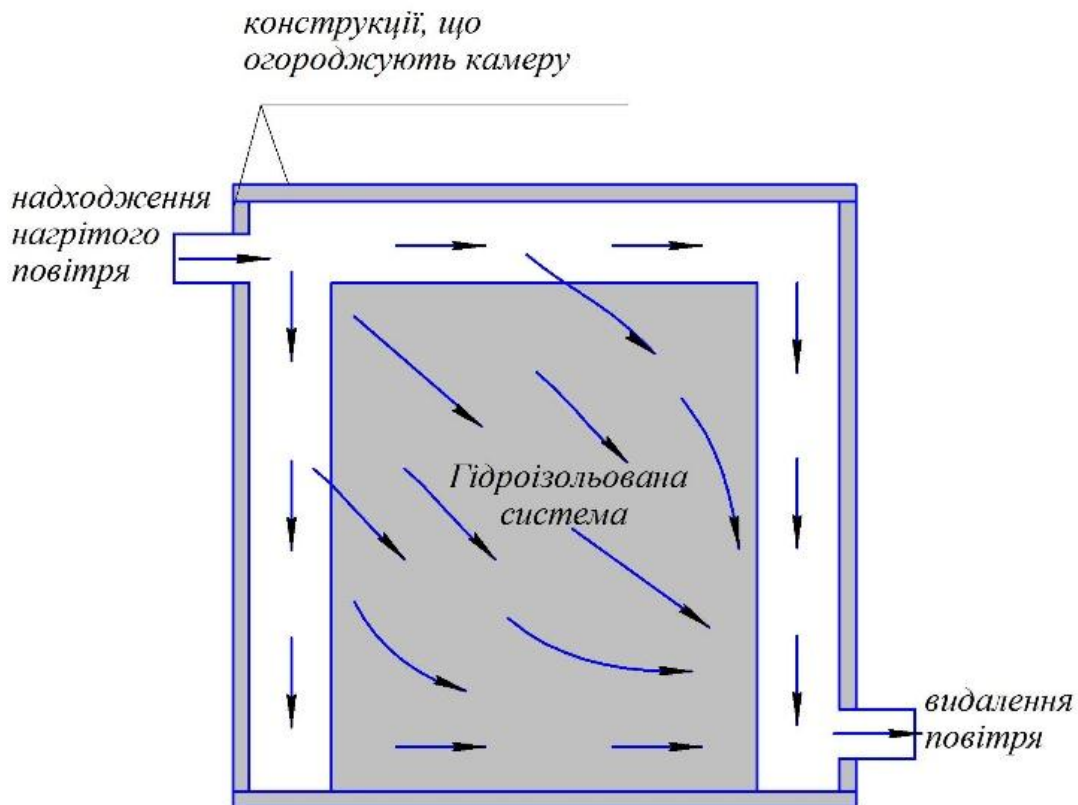


Рис. 3.15. Схема третього варіанта гідроізоляції бетонних або залізобетонних виробів

Тепловий баланс надземної камери в період теплової обробки нагрітим повітрям бетонних або залізобетонних виробів (при третьому варіанті їх гідроізоляції) для і-го проміжку часу має вигляд

$$Q_{KH} + Q_E = Q_{KB} + (Q_G + Q_{ПД1} + Q_{ГР1}) + Q_{КС} + Q_{КП} + \\ + Q_{СН} + Q_{ПН} + Q_{ПД2} + Q_{ГР2} + Q_{П}, \quad (3.94)$$

де Q_{KH} , Q_E , Q_{KB} , $Q_{КС}$, $Q_{КП}$, $Q_{СН}$, $Q_{ПН}$, $Q_{П}$ – ті ж величини, що й у тепловому балансі (3.60);

Q_G – витрати теплоти на нагрівання складових гідроізольованої системи впродовж і-го проміжку часу (з урахуванням особливостей цього варіанта гідроізоляції), Дж;

$Q_{ПД1}$ – витрати теплоти впродовж і-го проміжку часу на нагрівання частини підлоги камери, розташованої в межах гідроізольованої системи, Дж;

$Q_{ГР1}$ – витрати теплоти впродовж і-го проміжку часу на нагрівання відповідного ґрунту, Дж (за умови наявності цих втрат в і-й проміжок часу проміжок часу);

$Q_{ПД2}$ – витрати теплоти впродовж і-го проміжку часу на нагрівання частини підлоги камери, розташованої за межами гідроізольованої системи, Дж;

$Q_{ГР2}$ – витрати теплоти впродовж і-го проміжку часу на нагрівання відповідного ґрунту, Дж (за умови наявності цих втрат в і-й проміжок часу).

Підсумки:

1. Розроблено теплові баланси надземних камер для періоду теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів нагрітим повітрям (при другому та третьому варіантах гідроізоляції цих виробів).

При складанні теплових балансів заглиблених камер необхідно враховувати, що частина стінок камер розташована нижче рівня землі.

2. Розроблено теплові баланси гідроізольованих систем у період теплової обробки нагрітим повітрям бетонних або залізобетонних виробів при другому та третьому варіантах їх гідроізоляції.

3. При складанні теплових балансів гідроізолюваних систем (при другому та третьому варіантах гідроізоляції виробів) прийнято спрощення: повітряні прошарки в цих системах невеликі, тому їх впливом на процеси теплообміну в камері нехтують.

Слід зважати на те, що визначена з урахуванням указанного спрощення інтенсивність нагрівання гідроізолюваної системи буде більшою, ніж у виробничій камері.

Якщо неможливо знехтувати в розрахунках наявністю повітряних прошарків у гідроізолюваній системі, то потрібно здійснювати моделювання відповідних процесів теплообміну в лабораторній установці згідно з другим етапом досліджень (див. підрозділ 2.2).

4. Розроблено теплові баланси конструкцій, що огороджують камеру.

5. Якщо камера для теплової обробки нагрітим повітрям бетонних або залізобетонних виробів розташована в блоці камер, то це потрібно враховувати при складанні відповідних теплових балансів (див. [114]).

3.2.4. Визначення інтенсивності нагрівання або охолодження конструкцій, що огороджують камеру

Температурне поле конструкцій, що огороджують камеру, в період теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів – нестационарне.

Прийнято, що температура конструкцій камери змінюється тільки в напрямку по нормалі до їх поверхонь.

Диференціальне рівняння теплопровідності (3.44)

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$$

може бути вирішено методом скінченних різниць, який відображено, зокрема, в книзі [288].

У скінченних різницях диференційне рівняння (3.44) має вигляд

$$\frac{\Delta t}{\Delta \tau} = a \frac{\Delta^2 t}{\Delta x^2}. \quad (3.95)$$

Одношарова конструкція умовно розділяється на шари товщиною Δx , а час – на інтервали $\Delta \tau$.

Температура i -ї площини конструкції $t_{i, \tau+\Delta \tau}$ в момент часу $(\tau+\Delta \tau)$ обчислюється за залежністю

$$t_{i, \tau+\Delta \tau} = t_{i, \tau} + a \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} (t_{i+1, \tau} + t_{i-1, \tau} - 2t_{i, \tau}), \quad (3.96)$$

де $t_{i-1, \tau}$, $t_{i, \tau}$, $t_{i+1, \tau}$ – температури відповідно $(i-1)$ -ї, i -ї та $(i+1)$ -ї площин конструкції в момент часу τ , °С;

a – коефіцієнт теплопровідності матеріалу конструкції, м²/с.

Якщо вибрати інтервал часу $\Delta \tau$ і Δx таким чином, щоб виконувалася умова

$$\frac{2a \Delta \tau}{\Delta x^2} = 1, \quad (3.97)$$

то температуру в i -й площині конструкції в момент часу $(\tau+\Delta \tau)$ можна визначати за рівнянням

$$t_{i, \tau+\Delta \tau} = \frac{t_{i+1, \tau} + t_{i-1, \tau}}{2}. \quad (3.98)$$

Максимальний проміжок часу $\Delta \tau_{\text{макс}}$ для застосування рівняння (2.61) дорівнює

$$\Delta \tau_{\text{макс}} = \frac{\Delta x^2}{2a}. \quad (3.99)$$

Температура внутрішньої поверхні конструкції в момент часу $(\tau+\Delta \tau)$ обчислюється за залежністю

$$t_{1, \tau+\Delta \tau} = \frac{\alpha_1 t_{\text{П}} + \frac{\lambda}{\Delta x} t_{2, \tau}}{\alpha_1 + \frac{\lambda}{\Delta x}}, \quad (3.100)$$

де $t_{1, \tau+\Delta \tau}$ – температура першої площини конструкції в момент часу $(\tau+\Delta \tau)$, °С;

$t_{\text{П}}$ – температура повітря камери, °С;

$t_{2,\tau}$ – температура другої площини конструкції в момент часу τ , °С;

α_1 – коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, Вт/(м² · °С).

Температура останньої ((n+1)-ї) площини конструкції в момент часу ($\tau+\Delta\tau$) розраховується за залежністю

$$t_{n+1, \tau+\Delta\tau} = \frac{\alpha_2 t_{HC} + \frac{\lambda}{\Delta x} t_{n, \tau}}{\alpha_2 + \frac{\lambda}{\Delta x}}, \quad (3.101)$$

де n – кількість шарів, на які умовно поділено конструкцію;

t_{HC} – температура навколишнього середовища, °С;

$t_{n,\tau}$ – температура n-ї площини конструкції в момент часу τ , °С;

α_2 – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні конструкції, Вт/(м² · °С).

Витрати теплоти на нагрівання одношарової конструкції за вибраний проміжок часу визначаються за формулою

$$Q = \sum_{i=1}^{i=n} c m (t_{KШ_i} - t_{ПШ_i}), \quad (3.102)$$

де n – кількість шарів, на які умовно поділено одношарову конструкцію для визначення розподілу температури в ній;

c – питома масова теплоємність матеріалу конструкції, Дж/(кг · °С);

m – маса i-го умовного шару конструкції, кг; оскільки одношарова конструкція умовно поділена на однакові по товщині шари, то маси кожного з цих шарів однакові;

$t_{ПШ_i}$ – початкова температура i-го умовного шару конструкції, °С;

$t_{КШ_i}$ – температура i-го умовного шару конструкції наприкінці вибраного проміжку часу, °С.

Температура i-го умовного шару конструкції на початку вибраного проміжку часу обчислюється за рівнянням

$$t_{ПШ_i} = 0,5 (t_{i,\tau} + t_{i+1,\tau}), \quad (3.103)$$

де $t_{i,\tau}$ – температура на границі стикання $(i-1)$ -го та i -го умовних шарів конструкції на початку вибраного проміжку часу, °С;

$t_{i+1,\tau}$ – температура на границі стикання i -го та $(i+1)$ -го умовних шарів конструкції на початку вибраного проміжку часу, °С.

Температура i -го умовного шару конструкції наприкінці вибраного проміжку часу обчислюється за рівнянням

$$t_{кш_i} = 0,5 (t_{i,\tau+\Delta\tau} + t_{i+1,\tau+\Delta\tau}), \quad (3.104)$$

де $t_{i,\tau+\Delta\tau}$ – температура на границі стикання $(i-1)$ -го та i -го умовних шарів конструкції наприкінці вибраного проміжку часу, °С;

$t_{i+1,\tau+\Delta\tau}$ – температура на границі стикання i -го та $(i+1)$ -го умовних шарів конструкції наприкінці вибраного проміжку часу, °С.

При завантаженні в камеру сформованих виробів, температура яких нижча, ніж температура конструкцій, що огороджують камеру, а також у період охолодження бетонних чи залізобетонних виробів відбувається зниження температури цих конструкцій. Відповідна зміна тепловмісту одношарової конструкції за вибраний проміжок часу обчислюється за формулою

$$Q = \sum_{i=1}^{i=n} c m (t_{гш_i} - t_{кш_i}). \quad (3.105)$$

При визначенні розподілу температури в багатошаровій конструкції камери на умовні шари поділяється кожний шар конструкції (згідно з рекомендаціями, наведеними, зокрема, в книзі [288]).

Підсумки:

1. Наведено методику визначення інтенсивності нагрівання або охолодження конструкцій, що огороджують камеру для теплової обробки бетонних (залізобетонних) виробів.

2. Аналогічно визначається інтенсивність нагрівання: шару теплоізоляції колектора сонячної енергії (пункт 3.1.3); теплоізоляційної конструкції в камері для теплової обробки бетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу (підрозділи 4.2, 4.4).

3.2.5. Визначення коефіцієнтів тепловіддачі

Нижче наведено методики, які застосовано при обчисленні коефіцієнтів тепловіддачі в установці.

Примітка. При викладенні положень наведених нижче методик було використано позначення коефіцієнта тепловіддачі конвекцією $\bar{\alpha}$, використане в першоджерелах.

Обчислення коефіцієнта тепловіддачі α_c від повітря, що рухається в колекторі сонячної енергії, до відповідних поверхонь теплообміну здійснюється згідно з методикою, яка відображає процес конвективного теплообміну в каналах при вимушеному русі повітря.

Коефіцієнт тепловіддачі від нагрітого повітря до поверхонь каналу, Вт/(м²·°С), визначається за формулами, наведеними, зокрема, в джерелах [77, 162, 259].

Режим руху повітря в каналі встановлюється за значенням критерію Рейнольдса, який обчислюється за формулою

$$Re_{\Pi} = \frac{\omega d_{ек}}{\nu_{\Pi}}, \quad (3.106)$$

де $d_{ек}$ – еквівалентний діаметр каналу, м.

Залежність для визначення еквівалентного діаметра $d_{ек}$, м, має вигляд

$$d_{ек} = \frac{4f}{p}, \quad (3.107)$$

де f – площа поперечного перерізу каналу, м²;

p – периметр поперечного перерізу каналу, м.

При турбулентному русі повітря в каналі критерій Нуссельта може бути розрахований за формулою

$$\overline{Nu}_{\Pi} = 0,021 Re_{\Pi}^{0,8} Pr_{\Pi}^{0,43} \epsilon_l; \quad (3.108)$$

$$\bar{\alpha} = \overline{Nu_{\pi}} \frac{\lambda_{\pi}}{d_{ек}}. \quad (3.109)$$

Коефіцієнт тепловіддачі від зовнішніх поверхонь стінок камери до навколишнього середовища α_{CH} , Вт/(м²·°С), дорівнює

$$\alpha_{CH} = \alpha_{KC} + \alpha_{BC}, \quad (3.110)$$

де α_{KC} – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією (що супроводжується теплопровідністю) зовнішніх поверхонь стінок камери, Вт/(м²·°С);

α_{BC} – коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням зовнішніх поверхонь стінок камери, Вт/(м²·°С).

Коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні кришки камери до навколишнього середовища $\alpha_{ПН}$, Вт/(м²·°С), дорівнює

$$\alpha_{ПН} = \alpha_{КП} + \alpha_{ВП}, \quad (3.111)$$

де $\alpha_{КП}$ – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією (що супроводжується теплопровідністю) зовнішньої поверхні кришки камери, Вт/(м²·°С);

$\alpha_{ВП}$ – коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням зовнішньої поверхні кришки камери, Вт/(м²·°С).

Коефіцієнти тепловіддачі випромінюванням зовнішніх поверхонь конструкцій, що огороджують камеру для теплової обробки бетонних виробів, Вт/(м²·°С), розраховуються згідно з рекомендаціями, наведеними, зокрема, в джерелах [77, 162]:

– для стінок камери

$$\alpha_{BC} = \frac{\varepsilon_C c_0}{t_{C3} - t_{HC}} \left[\left(\frac{T_{C3}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{HC}}{100} \right)^4 \right]; \quad (3.112)$$

– для кришки камери

$$\alpha_{ВП} = \frac{\varepsilon_{ПР} c_0}{t_{ПЗ} - t_{HC}} \left[\left(\frac{T_{ПЗ}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{HC}}{100} \right)^4 \right], \quad (3.113)$$

($\Delta t = \Delta T$)

де T_{C3} , $T_{ПЗ}$ – середня за вибраний проміжок часу абсолютна температура зовнішніх поверхонь стінок та перекриття (або кришки) камери, К;

T_{HC} – абсолютна температура поверхонь цеху, К (приймається спрощення: температура внутрішніх поверхонь приміщення дорівнює температурі повітря приміщення); якщо таке спрощення застосувати неможливо, то здійснюється відповідне корегування у формулах.

Визначення середнього по висоті поверхні коефіцієнта тепловіддачі при природній конвекції може бути здійснено відповідно до рекомендацій джерел [77, 162]. Середній по висоті поверхні коефіцієнт тепловіддачі при природній конвекції $\bar{\alpha}$, Вт/(м²·°С), розраховується за залежністю

$$\bar{\alpha} = \overline{Nu}_n \frac{\lambda_n}{h}, \quad (3.114)$$

де h – висота поверхні теплообміну, м;

λ_n – коефіцієнт теплопровідності повітря, Вт/(м·°С);

індекс «п» показує, що фізичні властивості повітря визначаються при температурі повітря за межами пограничного шару t_n , °С.

Для вертикальних поверхонь при ламінарному режимі руху повітря в пограничному шарі ($10^3 < Gr_n Pr_n < 10^9$) згідно з рекомендаціями джерела [77] критерій Нуссельта \overline{Nu}_n обчислюється за формулою

$$\overline{Nu}_n = 0,75 (Gr_n Pr_n)^{0,25}; \quad (3.115)$$

у книзі [162] у цій формулі використано множник 0,76.

Для вертикальних поверхонь при турбулентному режимі руху повітря в пограничному шарі відповідно до рекомендацій джерела [77] критерій Нуссельта \overline{Nu}_n визначається за формулою

$$\overline{Nu}_n = 0,15 (Gr_n Pr_n)^{1/3}, \quad (3.116)$$

яка використовується при $Gr_n Pr_n \geq 6 \cdot 10^{10}$ (розвинений турбулентний рух повітря в пограничному шарі); у книзі [77] зазначається, що при $10^9 < Gr_n Pr_n < 6 \cdot 10^{10}$ має місце перехідний режим руху середовища в пограничному шарі; цю формулу у книзі [162] рекомендовано застосовувати при $Gr_n Pr_n > 10^9$.

Добуток $Gr_{\pi}Pr_{\pi}$ (критерій Релея Ra_{π}) обчислюється за формулою

$$Gr_{\pi} Pr_{\pi} = \frac{g \beta_{\pi} \Delta t h^3}{\nu_{\pi}^2} Pr_{\pi}, \quad (3.117)$$

де β_{π} – температурний коефіцієнт об'ємного розширення повітря, 1/град;
 Δt – температурний напір, °С.

Визначення середнього по висоті поверхні коефіцієнта тепловіддачі при природній конвекції може бути здійснено відповідно до рекомендацій довідника [259]. У довіднику наголошується, що розрахунок тепловіддачі вертикальної поверхні при $Gr_{\pi}Pr_{\pi} > 10^9$ виконується окремо для ділянок з ламінарним та турбулентним пограничними шарами. Індекс «р» показує, що фізичні властивості повітря визначаються при розрахунковій температурі t_p , °С, яка дорівнює

$$t_p = 0,5 (t_{\pi} + t_c), \quad (3.118)$$

де t_{π} – температура повітря за межами теплового пограничного шару, °С;
 t_c – температура поверхні теплообміну, °С.

Коефіцієнти тепловіддачі конвекцією зовнішніх поверхонь вертикальних конструкцій, що огорожують камери для теплової обробки бетонних виробів, можуть бути обчислені згідно з рекомендаціями, наведеними в книзі [152] або відображеними в книзі [21].

Коефіцієнти тепловіддачі горизонтальних поверхонь при природній конвекції визначаються за однією з наведених нижче методик.

У довіднику [259] рекомендовано середній коефіцієнт тепловіддачі горизонтальної пластини, поверхня якої обернена вгору, приймати таким, що дорівнює

$$\overline{\alpha}_{\text{гор}} = \overline{\alpha}_{\text{верт}}, \quad (3.119)$$

якщо поверхня пластини обернена вниз, то

$$\overline{\alpha}_{\text{гор}} = 0,5 \overline{\alpha}_{\text{верт}}, \quad (3.120)$$

де $\overline{\alpha}_{\text{верт}}$ – середній коефіцієнт тепловіддачі вертикальної пластини, Вт/(м²·°С), розрахований за відповідним рівнянням, наведеним у довіднику [259] за умови $(GrPr)_p < 10^9$, при цьому визначальним розміром є менша сторона пластини.

У книзі [292] рекомендовано обчислювати середній коефіцієнт тепловіддачі горизонтальної пластини, поверхня якої обернена вгору (при $t_c = \text{const}$), за формулою

$$\overline{\alpha} = \overline{Nu}_p \frac{\lambda_p}{l}, \quad (3.121)$$

де індекс «р» показує, що фізичні властивості повітря визначаються при розрахунковій температурі t_p , °С.

$$\text{При } Ra_p < 10^5 \quad \overline{Nu}_p = 1,1 Ra_p^{1/5}; \quad (3.122)$$

$$\text{при } Ra_p > 10^5 \quad \overline{Nu}_p = 0,203 Ra_p^{1/3}. \quad (3.123)$$

$$Ra_p = Gr_p Pr_p = \frac{g \beta_p \Delta t l^3}{\nu_p^2} Pr_p. \quad (3.124)$$

При обчисленні критерію Релея $Ra_p = Gr_p Pr_p$ та критерію Нуссельта \overline{Nu}_p визначальний розмір l , м, дорівнює

$$l = F / \Pi, \quad (3.125)$$

де F – площа горизонтальної поверхні, м²;

Π – периметр горизонтальної поверхні теплообміну, м;

Коефіцієнт тепловіддачі горизонтальної поверхні при природній конвекції може бути розрахований за рекомендаціями, наведеними в книзі [21], або за рекомендаціями, відображеними в книзі [152].

Обчислення коефіцієнтів тепловіддачі зовнішніх поверхонь колектора сонячної енергії за наявності вітру здійснюється за рекомендаціями, наведеними, наприклад, у джерелах [77, 162, 259].

Коефіцієнти тепловіддачі в тепловій камері визначаються залежно від її конструктивних особливостей за рекомендаціями, відображеними, наприклад, у джерелах [77, 162, 259].

Розрахунок коефіцієнтів тепловіддачі внутрішніх та зовнішніх поверхонь повітропроводів можна виконати відповідно до рекомендацій, наведених у книгах [77, 162, 252, 259, 260].

3.2.6. Алгоритм обчислення процесів теплообміну в установці для теплової обробки в закритих формах бетонних або залізобетонних виробів із використанням нагрітого повітря

Розглядаються процеси теплообміну в установці, призначеній для теплової обробки в закритих формах бетонних або залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії.

Гідроізоляція виробів відповідає першому варіантові (рис. 2.3, 3.11). Теплова камера – надземна.

При аналізі процесів теплообміну в установці прийнято спрощення:

а) нехтують різницею між температурами бетонних (залізобетонних) виробів (обумовлену особливостями теплообміну з навколишнім середовищем верхнього та нижнього виробів);

б) кількість сонячної енергії, що поглинається поверхнями повітропроводів (подаючого та зворотного), дорівнює сумі витрат теплоти на нагрівання стінок повітропроводів повітрям, яке циркулює в установці, та витрат теплоти в навколишнє середовище крізь стінки повітропроводів (за умови наявності цих витрат теплоти);

відповідно прийнято, що не відбувається зміна температури повітря в повітропроводах;

в) нехтують зміною температури повітря у вентиляторі.

Система рівнянь, які характеризують процеси теплообміну в установці для теплової обробки бетонних або залізобетонних виробів для і-го проміжку часу, з урахуванням указаних спрощень має вигляд

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_A + Q_{\text{ПС}} + Q_{\text{МПС}} = Q_{\text{СК}} + Q_{\text{СГ}} + Q_{\text{СВ}}; \\ Q_D = Q_M + Q_{\text{МП}} + Q_{\text{МСП}} + Q_T + Q_{\text{ТГ}}; \\ Q_A + Q_D + Q_H = Q_B + Q_M + Q_{\text{СК}} + Q_{\text{СГ}} + Q_{\text{СВ}} + Q_T + Q_{\text{ТГ}}; \\ Q_{\text{КН}} + Q_E = Q_{\text{КВ}} + Q_{\text{БС}} + Q_{\text{КС}} + Q_{\text{КП}} + Q_{\text{ПД}} + Q_{\text{СН}} + Q_{\text{ПН}} + Q_O; \\ Q_{\text{БС}} = Q_{\text{ПБС}} + Q_E \pm Q_{\text{РСС}} \pm Q_{\text{РПВ}} \pm Q_{\text{РПН}}; \\ Q_{\text{ПСК}} \pm Q_{\text{РСС}} = Q_{\text{КС}} + Q_{\text{СН}}; \\ Q_{\text{ПП}} \pm Q_{\text{РПВ}} = Q_{\text{КП}} + Q_{\text{ПН}}; \\ Q_{\text{ППД}} \pm Q_{\text{РПН}} = Q_{\text{ПД}}. \end{array} \right. \quad (3.126)$$

Нижче наведено визначення складових указаних рівнянь.

$$1) Q_A + Q_{\text{ПС}} + Q_{\text{МСП}} = Q_{\text{СК}} + Q_{\text{СГ}} + Q_{\text{СВ}}$$

(тепловий баланс світлопрозорого покриття

коллектора сонячної енергії для і-го проміжку часу (3.5)).

$$Q_A = A Q_C.$$

$$Q_{\text{ПС}} = \alpha_C (t_{\text{ПОВ}} - t_C) F_{\text{СВ}} \Delta\tau;$$

$$\alpha_C = \bar{\alpha} = \overline{\text{Nu}}_{\text{П}} \frac{\lambda_{\text{П}}}{d_{\text{ЕК}}};$$

$$\overline{\text{Nu}}_{\text{П}} = 0,021 \text{Re}_{\text{П}}^{0,8} \text{Pr}_{\text{П}}^{0,43} \varepsilon_l;$$

$$\text{Re}_{\text{П}} = \frac{\omega d_{\text{ЕК}}}{\nu_{\text{П}}};$$

$$d_{\text{ЕК}} = \frac{4f}{p}.$$

$$Q_{\text{СК}} = c_C m_C (t_{\text{СК}} - t_{\text{СП}}).$$

$$Q_{\text{СГ}} = \alpha_{\text{СГ}} (t_C - t_{\text{НС}}) F_{\text{СЗГ}} \Delta\tau; \text{ швидкість вітру біля коллектора } \omega \approx 0 \text{ м/с};$$

$$\alpha_{\text{СГ}} = \bar{\alpha} = \overline{\text{Nu}}_{\text{П}} \frac{\lambda_{\text{П}}}{l};$$

$$l = F / \Pi;$$

$$t_p = 0,5 (t_{\text{ПОВ}} + t_C);$$

$$Ra_p = Gr_p Pr_p = \frac{g \beta_p \Delta t l^3}{\nu_p^2} Pr_p;$$

при $Ra_p < 10^5$ $\overline{Nu}_p = 1,1 Ra_p^{1/5}$; при $Ra_p > 10^5$ $\overline{Nu}_p = 0,203 Ra_p^{1/3}$.

$$Q_{CB} = \alpha_{CB} (t_C - t_{HC}) F_{CЗВ} \Delta\tau;$$

$$\alpha_{CB} = \bar{\alpha} = \overline{Nu}_n \frac{\lambda_n}{h};$$

$$Gr_n Pr_n = \frac{g \beta_n \Delta t h^3}{\nu_n^2} Pr_n;$$

при $10^3 < Gr_n Pr_n < 10^9$: $\overline{Nu}_n = 0,75 (Gr_n Pr_n)^{0,25}$;

при $Gr_n Pr_n \geq 6 \cdot 10^{10}$: $\overline{Nu}_n = 0,15 (Gr_n Pr_n)^{1/3}$.

$$Q_{MCP} = \varepsilon_n c_0 \left[\left[\left(\frac{T_M}{100} \right) \right]^4 - \left[\left(\frac{T_C}{100} \right) \right]^4 \right] F_M \Delta\tau.$$

$$2) Q_D = Q_M + Q_{МП} + Q_{MCP} + Q_T + Q_{TT}$$

(сумісний тепловий баланс теплосприймаючої металеві пластини та шару теплоізоляції колектора сонячної енергії для і-го проміжку часу (3.18)).

$$Q_D = DQ_C.$$

$$Q_M = c_M m_M (t_{MK} - t_{MP}).$$

$$Q_{МП} = \alpha_C (t_M - t_{ПОВ}) F_M \Delta\tau.$$

Визначення Q_T :

$$Q_T = \sum_{i=1}^{i=n} c m (t_{KШ_i} - t_{ПШ_i});$$

$$t_{KШ_i} = 0,5 (t_{i,\tau+\Delta\tau} + t_{i+1,\tau+\Delta\tau});$$

$$t_{ПШ_i} = 0,5 (t_{i,\tau} + t_{i+1,\tau});$$

$$t_{i,\tau+\Delta\tau} = \frac{t_{i+1,\tau} + t_{i-1,\tau}}{2} \text{ за умови } \frac{2a \Delta\tau}{\Delta x^2} = 1; \quad a = \frac{\lambda}{c\rho}.$$

$$Q_{TT} = \alpha \Delta t F.$$

Формулу для визначення Q_{MCP} наведено вище.

$$3) Q_A + Q_D + Q_H = Q_B + Q_M + Q_{CK} + Q_{CG} + Q_{CB} + Q_T + Q_{TG}$$

(тепловий баланс плоского

коллектора сонячної енергії для і-го проміжку часу (3.31)).

$$Q_H = c_{ПН} \rho_{ПН} L t_{ПН} \Delta \tau.$$

$$Q_B = c_{ПВ} \rho_{ПВ} L t_{ПВ} \Delta \tau.$$

Визначення інших складових цього теплового балансу наведено вище.

$$4) Q_{KH} + Q_E = Q_{KB} + Q_{BC} + Q_{KC} + Q_{KP} + Q_{PD} + Q_{CH} + Q_{PH} + Q_O$$

(тепловий баланс надземної камери для теплової обробки бетонних або залізобетонних виробів нагрітим повітрям для і-го проміжку часу (3.60);

прийнято: $Q_{GP} = 0$; $Q_{PI} = 0$ (в камері відсутні повітропроводи)).

$$Q_{KH} = c_{ПП} \rho_{ПП} L t_{ПП} \Delta \tau.$$

$$Q_{KB} = c_{ПК} \rho_{ПК} L t_{ПК} \Delta \tau.$$

$$Q_{BC} = c_{BC} m_{BC} (t_{BCK} - t_{BCPI}).$$

Формули, що використовуються при визначенні Q_{KC} :

$$Q_{KC} = \sum_{i=1}^{i=n} c m (t_{KШ_i} - t_{ПШ_i});$$

$$t_{KШ_i} = 0,5 (t_{i,\tau+\Delta\tau} + t_{i+1,\tau+\Delta\tau});$$

$$t_{ПШ_i} = 0,5 (t_{i,\tau} + t_{i+1,\tau});$$

$$t_{i,\tau+\Delta\tau} = \frac{t_{i+1,\tau} + t_{i-1,\tau}}{2} \text{ за умови } \frac{2a \Delta\tau}{\Delta x^2} = 1; \quad a = \frac{\lambda}{c\rho}.$$

Аналогічно визначаються витрати теплоти Q_{KP} , Q_{PD} .

$$Q_{CH} = \alpha_{CH} (t_{C3} - t_{HC}) F_{C3} \Delta \tau;$$

$$\alpha_{CH} = \alpha_{KC} + \alpha_{BC};$$

$$\alpha_{KC} = \bar{\alpha} = \overline{Nu}_{\Pi} \frac{\lambda_{\Pi}}{h};$$

$$Gr_{\Pi} Pr_{\Pi} = \frac{g \beta_{\Pi} \Delta t h^3}{\nu_{\Pi}^2} Pr_{\Pi};$$

$$\text{при } 10^3 < Gr_{\Pi} Pr_{\Pi} < 10^9 \quad \overline{Nu}_{\Pi} = 0,75 (Gr_{\Pi} Pr_{\Pi})^{0,25};$$

$$\text{при } Gr_{\Pi} Pr_{\Pi} \geq 6 \cdot 10^{10} \quad \overline{Nu}_{\Pi} = 0,15 (Gr_{\Pi} Pr_{\Pi})^{1/3};$$

$$\alpha_{BC} = \frac{\varepsilon_C c_0}{t_{C3} - t_{HC}} \left[\left(\frac{T_{C3}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{HC}}{100} \right)^4 \right].$$

$$Q_{ПН} = \alpha_{ПН} (t_{ПЗ} - t_{HC}) F_{ПЗ} \Delta\tau.$$

$$\alpha_{ПН} = \alpha_{КП} + \alpha_{ВП};$$

$$\alpha_{КП} = \bar{\alpha} = \overline{Nu_p} \frac{\lambda_p}{l};$$

$$l = F / \Pi;$$

$$t_p = 0,5 (t_{П} + t_c);$$

$$Ra_p = Gr_p Pr_p = \frac{g \beta_p \Delta t l^3}{\nu_p^2} Pr_p;$$

$$\text{при } Ra_p < 10^5 \quad \overline{Nu_p} = 1,1 Ra_p^{1/5}; \quad \text{при } Ra_p > 10^5 \quad \overline{Nu_p} = 0,203 Ra_p^{1/3};$$

$$\alpha_{ВП} = \frac{\varepsilon_{ПР} c_0}{t_{ПЗ} - t_{HC}} \left[\left(\frac{T_{ПЗ}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{HC}}{100} \right)^4 \right].$$

$$5) Q_{BC} = Q_{ПВС} + Q_{ЕС} \pm Q_{РСС} \pm Q_{РПВ} \pm Q_{РПН}$$

(тепловий баланс гідроізованих

бетонних або залізобетонних виробів для і-го проміжку часу (3.132)).

$$Q_{BC} = c_{BC} m_{BC} (t_{БСК} - t_{БСП}).$$

Визначення $Q_{ПВС}$:

$$- \text{або } Q_{ПВС} = c_{BC} m_{BC} (t_{П} - t_{БСП}) \beta_C;$$

$$\beta_C = f(F_0);$$

$$F_0 = \Delta\tau / c_{BC} m_{BC} R_{BC};$$

$$R_{BC} = m_{BC} / (\rho_{BC} \lambda_{BC} F_{BC}^2) + 1 / (\alpha F_{BC});$$

$$- \text{або } Q_{ПВС} = [2\delta F_{BC} \rho_{BC} c_{BC} (\overline{t_{СК}} - t_{БСП})] n$$

(якщо гідроізовані бетонні або залізобетонні вироби мають форму пластини);

$$\overline{t_{СК}} = t_{П} - \overline{\Theta_{СК}} (t_{П} - t_{БСП});$$

якщо $F_0 \geq 0,3$, то

$$\overline{\Theta}_{\text{СК}} = \frac{t_{\text{П}} - \overline{t}_{\text{СК}}}{t_{\text{П}} - t_{\text{БСП}}} = \frac{2 \sin^2 \mu_1}{\mu_1^2 + \mu_1 \sin \mu_1 \cos \mu_1} \exp(-\mu_1^2 Fo);$$

$$Fo = \frac{a\tau}{\delta^2};$$

$$a = \frac{\lambda}{c\rho};$$

$$c = c_{\text{БС}}; \rho = \rho_{\text{БС}}; \lambda = \lambda_{\text{БС}}; a = a_{\text{БС}};$$

$$\mu_n = f(Bi);$$

$$Bi = \frac{\alpha\delta}{\lambda}.$$

Визначення $Q_{\text{РСС}}$, $Q_{\text{РПВ}}$, $Q_{\text{РПН}}$ здійснюється за загальною формулою:

$$Q_p = \varepsilon_{\text{П}} c_0 \left[\left(\frac{T_{\text{с1}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{с2}}}{100} \right)^4 \right] F_1 \Delta\tau;$$

$$\varepsilon_{\text{П}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}.$$

$$6) Q_{\text{ПСК}} \pm Q_{\text{РСС}} = Q_{\text{КС}} + Q_{\text{СН}}$$

(тепловий баланс стінок камери для і-го проміжку часу

(аналог теплового балансу (3.89));

$$7) Q_{\text{ПП}} \pm Q_{\text{РПВ}} = Q_{\text{КП}} + Q_{\text{ПН}}$$

(тепловий баланс кришки камери для і-го проміжку часу

(аналог теплового балансу (3.90));

$$8) Q_{\text{ППД}} \pm Q_{\text{РПН}} = Q_{\text{ПД}}$$

(тепловий баланс підлоги (днища) камери для і-го проміжку часу

(аналог теплового балансу (3.91));

$$Q_{\text{ПСК}}, Q_{\text{ПП}}, Q_{\text{ППД}}: Q = \alpha \Delta t F \Delta\tau.$$

Обчислення процесів теплообміну в установці здійснюються методом ітерацій (послідовних наближень).

1. Загальний термін, упродовж якого відбувається нагрівання бетонних або залізобетонних виробів, розділяється на проміжки часу тривалістю Δt (рекомендації наведено в пункті 3.2.4). Для кожного із цих проміжків часу складаються відповідні теплові баланси.

2. Визначаються надходження теплоти Q_E впродовж першого проміжку часу внаслідок наявності екзотермічних реакцій гідратації цементу.

3. Приймається орієнтовне значення середньої температури бетонних (залізобетонних) виробів, форм, кришок або гідроізоляційного матеріалу наприкінці першого проміжку часу $t_{БСК}$, та обчислюється орієнтовне значення температури $t_{БС}$.

Орієнтовне значення середньої за перший проміжок часу температури бетонних (залізобетонних) виробів, форм, кришок або гідроізоляційного матеріалу $t_{БС}$ дорівнює

$$t_{БС} = 0,5 (t_{БСП} + t_{БСК}), \quad (3.127)$$

де $t_{БСП}$ – середня температура бетонних (залізобетонних) виробів, форм, кришок або гідроізоляційного матеріалу відповідно на початку та наприкінці i -го проміжку часу, °С.

4. Обчислюється кількість теплоти $Q_{ПБС}$, яку сприймають бетонні (залізобетонні) вироби, форми, кришки або гідроізоляційний матеріал від нагрітого повітря за перший проміжок часу.

4.1. Приймається орієнтовне значення середньої за перший проміжок часу температури $t_{ПК}$, з котрою повітря видаляється з камери, та обчислюється орієнтовне значення температури $t_{П}$.

Орієнтовне значення середньої за перший проміжок часу температури повітря в камері $t_{П}$, °С, дорівнює

$$t_{П} = 0,5 (t_{ПП} + t_{ПК}), \quad (3.128)$$

де $t_{ПП}$ – середня за перший проміжок часу температура повітря, що надходить до камери, °С.

4.2. Розраховується коефіцієнт тепловіддачі α від нагрітого повітря до поверхонь теплообміну згідно з методиками, наведеними в пункті 3.2.5.

4.3. Визначається кількість теплоти $Q_{\text{ПБС}}$.

Кількість теплоти $Q_{\text{ПБС}}$, Дж, може бути обчислена за формулою

$$Q_{\text{ПБС}} = c_{\text{БС}} m_{\text{БС}} (t_{\text{П}} - t_{\text{БСП}}) \beta_{\text{С}}, \quad (3.129)$$

де $m_{\text{БС}}$ – маса бетонних (залізобетонних) виробів, форм, кришок або гідроізоляційного матеріалу, кг;

коефіцієнт $\beta_{\text{С}}$ визначається за довідковими даними за допомогою критерію Фур'є, який дорівнює

$$F_0 = \Delta t / c_{\text{БС}} m_{\text{БС}} R_{\text{БС}} ; \quad (3.130)$$

$$R_{\text{БС}} = m_{\text{БС}} / (\rho_{\text{БС}} \lambda_{\text{БС}} F_{\text{БС}}^2) + 1 / (\alpha F_{\text{БС}}) . \quad (3.131)$$

5. Приймаються орієнтовні значення температур внутрішніх поверхонь конструкцій, що огороджують теплову камеру, наприкінці першого проміжку часу.

6. Обчислюється кількість теплоти, що передається від гідроізольованих бетонних (залізобетонних) виробів до внутрішніх поверхонь конструкцій, що огороджують теплову камеру (або у зворотному напрямку) за перший проміжок часу внаслідок наявності результуючого випромінювання.

За загальною формулою (3.78) обчислюються:

– кількість теплоти $Q_{\text{РСС}}$, Дж, що передається впродовж першого проміжку часу внаслідок наявності результуючого випромінювання від вертикальних поверхонь форм до внутрішніх поверхонь стінок камери (або у зворотному напрямку);

– кількість теплоти $Q_{\text{РПВ}}$, Дж, що передається впродовж першого проміжку часу внаслідок наявності результуючого випромінювання від гідроізольованої

поверхні верхнього виробу до внутрішньої поверхні кришки камери (або у зворотному напрямку);

– кількість теплоти $Q_{РПН}$, Дж, що передається впродовж першого проміжку часу внаслідок наявності результуючого випромінювання від днища нижньої форми до поверхні днища камери (або у зворотному напрямку).

7. Складаються теплові баланси конструкцій, що огорожують камеру.

Принцип складання цих теплових балансів відображено в пункті 3.2.3 (див. рівняння (3.89) – (3.91)).

Уточнюються (попередньо) температури внутрішніх поверхонь конструкцій, що огорожують камеру, наприкінці першого проміжку часу.

8. Уточнюється (попередньо) температура $t_{БСК}$ за допомогою теплового балансу гідроізолюваних бетонних виробів

$$Q_{БС} = Q_{ПБС} + Q_{ЕС} \pm Q_{РСС} \pm Q_{РПВ} \pm Q_{РПН}, \quad (3.132)$$

$$\text{або} \quad c_{БС} m_{БС} (t_{БСК} - t_{БСП}) = Q_{ПБС} + Q_{Е} \pm Q_{РСС} \pm Q_{РПВ} \pm Q_{РПН}. \quad (3.133)$$

Якщо ліва частина рівняння (3.133) не дорівнює правій частині, то підбирається таке значення середньої температури $t_{БСК}$, при якому ліва частина цього рівняння дорівнює його правій частині.

9. Уточнюються: середня за перший проміжок часу температури $t_{ПК}$, з якою повітря видаляється з камери; середня температури бетонних (залізобетонних) виробів, форм, кришок або гідроізоляційного матеріалу наприкінці першого проміжку часу $t_{БСК}$; температури внутрішніх поверхонь конструкцій, що огорожують теплову камеру, наприкінці першого проміжку часу.

9.1. Розраховується за формулою (3.62) кількість теплоти $Q_{КН}$, що надходить до камери впродовж першого проміжку часу з нагрітим повітрям,

$$Q_{КН} = c_{ПП} \rho_{ПП} L t_{ПП} \Delta t.$$

9.2. Розраховуються за формулою (3.63) втрати теплоти Q_{KB} упродовж першого проміжку часу з повітрям, що видаляється з камери,

$$Q_{KB} = c_{ПК} \rho_{ПК} L t_{ПК} \Delta t.$$

9.3. Розраховуються витрати теплоти за перший проміжок часу на нагрівання устаткування Q_0 .

9.4. Уточнюються температури $t_{ПК}$, $t_{БСК}$ та температури внутрішніх поверхонь конструкцій, що огороджують теплову камеру, наприкінці першого проміжку часу.

Складається тепловий баланс камери, який для першого проміжку часу має вигляд

$$Q_{KH} + Q_E = Q_{KB} + Q_{БС} + Q_{КС} + Q_{КП} + Q_{ПД} + Q_0; \quad (3.134)$$

враховується, що для першого проміжку часу $Q_{CH} = 0$; $Q_{PH} = 0$; $Q_{ГРС} = 0$; $Q_{ГРП} = 0$; в камері відсутні повітропроводи $Q_{П} = 0$; ґрунт не нагрівається $Q_{ГР} = 0$.

Якщо ліва частина цього рівняння не дорівнює правій частині, то розглядаються одночасно для першого проміжку часу:

– тепловий баланс гідроізольованих бетонних або залізобетонних виробів (3.132);

– тепловий баланс камери для теплової обробки бетонних або залізобетонних виробів нагрітим повітрям (3.60);

– теплові баланси конструкцій, що огороджують камеру (3.89) – (3.91).

Методом ітерацій підбираються такі значення $t_{ПК}$, $t_{БСК}$ та температур внутрішніх поверхонь огороджувальних конструкцій наприкінці першого проміжку часу, щоб у вказаних рівняннях ліва частина дорівнювала правій частині.

10. Складаються для першого проміжку часу теплові баланси колектора сонячної енергії (3.5), (3.18), (3.31).

11. Здійснюється сумісний аналіз теплових балансів колектора сонячної енергії та камери й остаточно уточнюються: середня за перший проміжок часу температура $t_{ПК}$, з якою повітря видаляється з камери; середня температура

бетонних (залізобетонних) виробів, форм, кришок або гідроізоляційного матеріалу наприкінці першого проміжку часу $t_{\text{БСК}}$; температури внутрішніх поверхонь конструкцій камери наприкінці першого проміжку часу; середня за перший проміжок часу температура повітря на виході з колектора сонячної енергії $t_{\text{ПВ}}$; температура світлопрозорого покриття колектора наприкінці першого проміжку часу $t_{\text{СК}}$; температура металеві пластини колектора сонячної енергії наприкінці першого проміжку часу $t_{\text{МК}}$.

12. Аналогічні обчислення виконуються для інших проміжків часу.

Підсумки:

1. Розроблено алгоритм обчислення процесів теплообміну в установці, призначеній для теплової обробки бетонних або залізобетонних виробів (при першому варіанті їх гідроізоляції) із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії.

2. Якщо при русі повітря в зовнішніх повітропроводах відбувається зміна температури повітря, то систему теплових балансів установки (3.126) необхідно доповнити тепловими балансами зовнішніх повітропроводів.

3. Якщо в камері наявні повітропроводи, то тепловий баланс камери необхідно доповнити відповідною складовою (див. рівняння (3.60)).

4. Якщо швидкість руху повітря біля колектора сонячної енергії $\omega > 0$ м/с, то цей фактор потрібно врахувати в обчисленнях.

5. Якщо нагрівання повітря відбувається не в колекторі сонячної енергії, а в електричному повітронагрівачі, то необхідно:

- вилучити із системи теплових балансів установки (3.126) рівняння, які характеризують процеси теплообміну в колекторі сонячної енергії;
- урахувати наявність надходжень теплоти від повітронагрівача;
- доповнити систему теплових балансів установки (3.126) тепловими балансами зовнішніх повітропроводів.

3.2.7. Аналіз процесів теплообміну в установках для теплової обробки бетонних виробів із використанням нагрітого повітря

Розглядається установка, до складу якої входять: колектор сонячної енергії, камера для теплової обробки бетонних тротуарних плиток, вентилятор та повітропроводи, що з'єднують колектор і камеру (рис. 2.2).

Приклад 3.1. Досліджується плоский колектор сонячної енергії (рис. Б.1,а). Мета – визначення інтенсивності нагрівання повітря в колекторі при різній витраті повітря.

Температура повітря на вході до колектора сонячної енергії обумовлюється зміною температури повітря в тепловій камері та в повітропроводах. Різна витрата повітря призводить до різної інтенсивності його охолодження в тепловій камері та у повітропроводах. Тому в установці для теплової обробки бетонних виробів температура повітря на вході до колектора буде різною при різній витраті повітря.

Запропоновано на попередньому етапі досліджень здійснювати аналіз інтенсивності нагрівання повітря в плоскому колекторі сонячної енергії для початкового проміжку часу. Це дозволяє прийняти однакою температуру повітря на вході до колектора при різній витраті повітря. Такі випадки можливі, якщо колектор входить до складу різних установок (охолодження повітря, нагрітого в колекторі, відбувається в теплових камерах з різною масою бетонних виробів і т. ін.).

Прийнято:

- розрахунковий проміжок часу дорівнює 15 хв; пояснення стосовно визначення розрахункового проміжку часу наведено в пункті 3.2.4;
- середня за перші 15 хв температура повітря на вході до колектора сонячної енергії $t_{\text{ПН}} = 22^{\circ}\text{C}$;
- температура навколишнього середовища $t_{\text{НС}} = 20^{\circ}\text{C}$;
- довжина та ширина теплосприймаючої металеві пластини дорівнюють 1 м ($F = 1 \text{ м}^2$);

- світлопрозоре покриття – скло; прозорими є горизонтальна поверхня й частка бокових сторін колектора ;
- конструктивні елементи, які призначено для компонування складових світлопрозорого покриття, зроблено з деревини;
- швидкість вітру біля колектора сонячної енергії дорівнює нулю;
- кліматичні умови – місто Полтава, червень (за ясного неба).

Надходження сонячної енергії до поверхонь колектора (за ясного неба) визначено згідно з даними норм [50].

Тепловий баланс колектора сонячної енергії для початкового проміжку часу має вигляд

$$Q_A + Q_D + Q_{AK} = Q_{ПОВ} + Q_M + Q_C + Q_D + Q_T + Q_{CG} + Q_{CB} + Q_{DG} + Q_{DB}, \quad (3.135)$$

де Q_A – кількість сонячної енергії, що поглинається світлопрозорим покриттям колектора сонячної енергії впродовж початкового проміжку часу, Дж;

Q_D – кількість сонячної енергії, що проходить крізь світлопрозоре покриття колектора впродовж початкового проміжку часу, Дж;

Q_{AK} – кількість сонячної енергії, що поглинається конструктивними елементами колектора (на які потрапляє ця енергія) впродовж початкового проміжку часу, Дж;

$Q_{ПОВ}$ – кількість теплоти, що витрачається на нагрівання повітря в колекторі сонячної енергії впродовж початкового проміжку часу, Дж;

Q_M, Q_C, Q_D, Q_T – кількість теплоти, що витрачається впродовж початкового проміжку часу на нагрівання відповідно теплосприймаючої металевої пластини, світлопрозорого покриття, конструктивних елементів і шару теплоізоляції колектора сонячної енергії, Дж;

$Q_{CG}, Q_{CB}, Q_{DG}, Q_{DB}$ – кількість теплоти, що втрачається впродовж початкового проміжку часу в навколишнє середовище крізь горизонтальні та

вертикальні поверхні світлопрозорого покриття і конструктивних елементів колектора сонячної енергії, Дж.

В обчисленнях запропоновано нехтувати надходженням сонячної енергії Q_{AT} до тих вертикальних поверхонь шару теплоізоляції, на котрі потрапляє ця енергія.

Кількість теплоти, що витрачається на нагрівання повітря в колекторі сонячної енергії впродовж вибраного проміжку часу, дорівнює

$$Q_{ПОВ} = Q_B - Q_H, \quad (3.136)$$

де Q_B – кількість теплоти, що видаляється з колектора сонячної енергії з нагрітим повітрям упродовж вибраного проміжку часу, Дж;

$$Q_B = c_{ПВ} \rho_{ПВ} L t_{ПВ} = c_{ПВ} (353/(273 + t_{ПВ})) L t_{ПВ} \Delta\tau; \quad (3.137)$$

Q_H – кількість теплоти, що надходить до колектора сонячної енергії з повітрям упродовж вибраного проміжку часу, Дж;

$$Q_H = c_{ПН} \rho_{ПН} L t_{ПН} = c_{ПН} (353/(273 + t_{ПН})) L t_{ПН} \Delta\tau, \quad (3.138)$$

де L – витрата повітря, m^3/c .

Тепловий баланс колектора сонячної енергії для початкового періоду використання колектора можна відобразити так:

$$Q_A + Q_D + Q_{AK} = Q_{ПОВ} + Q_M + Q_{СДТ} + Q_{СДГВ}, \quad (3.139)$$

де $Q_{СДТ}$ – кількість теплоти, що витрачається впродовж вибраного проміжку часу на нагрівання світлопрозорого покриття, конструктивних елементів і шару теплоізоляції колектора сонячної енергії, Дж;

$Q_{СДГВ}$ – кількість теплоти, що втрачається впродовж вибраного проміжку часу в навколишнє середовище крізь горизонтальні та вертикальні поверхні

світлопрозорого покриття і конструктивних елементів колектора сонячної енергії, Дж,

$$Q_{\text{сдт}} = Q_{\text{с}} + Q_{\text{д}} + Q_{\text{т}}; \quad (3.140)$$

$$Q_{\text{сдгв}} = Q_{\text{сг}} + Q_{\text{св}} + Q_{\text{дг}} + Q_{\text{дв}}. \quad (3.141)$$

Обчислення здійснено з використанням спрощення: середня за і-й проміжок часу температура світлопрозорого покриття $t_{\text{с}}$ приймається такою, що дорівнює

$$t_{\text{с}} = 0,5(t_{\text{пов}} + t_{\text{нс}}), \quad (3.142)$$

де $t_{\text{пов}}$ – середня за і-й проміжок часу температура повітря в колекторі, °С;

$t_{\text{нс}}$ – температура навколишнього середовища, °С.

Аналогічно (спрощено) визначено температуру конструктивних елементів.

У табл. 3.1 показано результати обчислення зміни температури повітря в колекторі сонячної енергії впродовж перших 15 хв його використання в досліджуваних умовах: середню за перші 15 хв температуру повітря на виході з колектора $t_{\text{пв}}$, °С; різницю між середніми температурами повітря на виході з колектора та на вході до нього ($t_{\text{пв}} - t_{\text{пн}}$), °С.

Таблиця 3.1

Зміна температури повітря
в колекторі сонячної енергії (приклад 4.1)

L, м ³ /год	$t_{\text{пв}}$, °С	$t_{\text{пв}} - t_{\text{пн}}$, °С
300	25,96	3,96
800	23,86	1,86
1300	23,24	1,24
1800	22,93	0,93
2300	22,75	0,75

На рис. 3.16 – 3.20 відображено втрати і витрати теплоти колектором сонячної енергії впродовж початкових 15 хв його використання за умов: $L = 300 \text{ м}^3/\text{год}$; $L = 800 \text{ м}^3/\text{год}$; $L = 1300 \text{ м}^3/\text{год}$; $L = 1800 \text{ м}^3/\text{год}$; $L = 2300 \text{ м}^3/\text{год}$ (приклад 3.1).

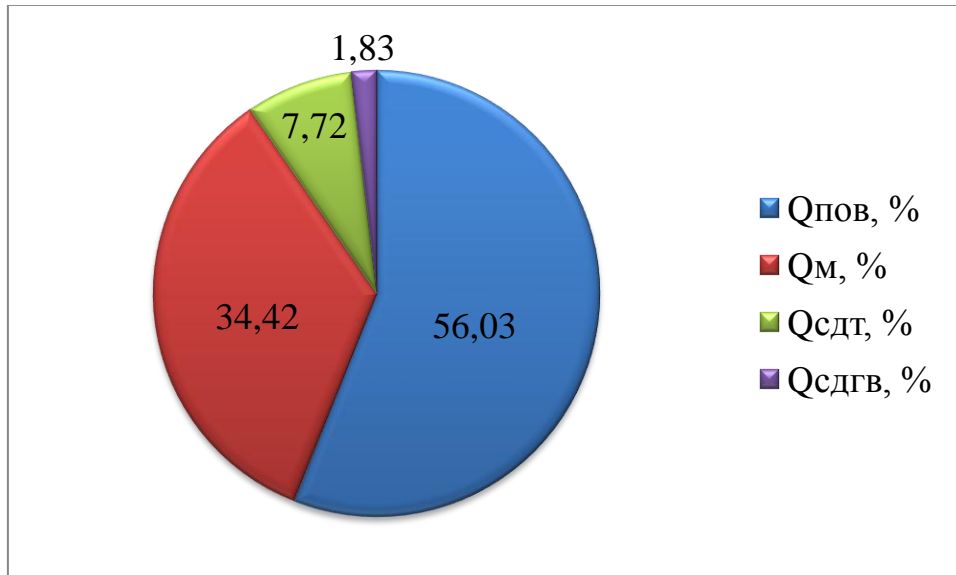


Рис. 3.16. Втрати і витрати теплоти в колекторі сонячної енергії впродовж початкових 15 хв (приклад 3.1, $L = 300 \text{ м}^3/\text{год}$):

$Q_{\text{пов}}$ – кількість теплоти, що витрачається на нагрівання повітря в колекторі сонячної енергії впродовж перших 15 хв (у відсотках від загальних втрат і витрат теплоти);

$Q_{\text{м}}$ – кількість теплоти, що витрачається на нагрівання теплосприймаючої металевої пластини впродовж перших 15 хв (у відсотках від загальних втрат і витрат теплоти);

$Q_{\text{сдт}}$ – кількість теплоти, що витрачається на нагрівання світлопрозорого покриття, конструктивних елементів і шару теплоізоляції колектора сонячної енергії впродовж перших 15 хв (у відсотках від загальних втрат і витрат теплоти);

$Q_{\text{сдгв}}$ – кількість теплоти, що втрачається в навколишнє середовище крізь горизонтально та вертикально розташовані частини світлопрозорого покриття й конструктивні елементи колектора сонячної енергії впродовж перших 15 хв (у відсотках від загальних втрат і витрат теплоти)

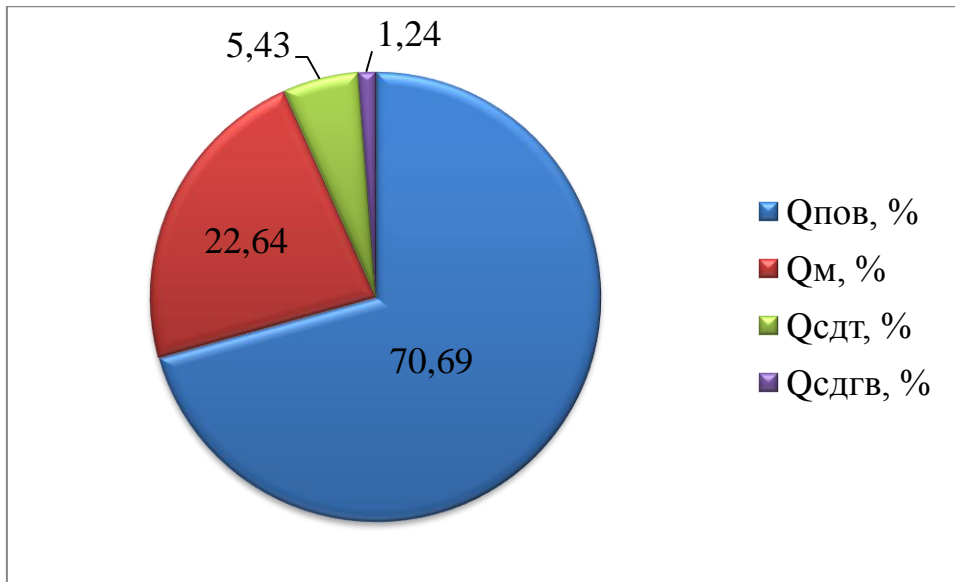


Рис. 3.17. Втрати і витрати теплоти в колекторі сонячної енергії впродовж початкових 15 хв (приклад 3.1, $L = 800 \text{ м}^3/\text{год}$)

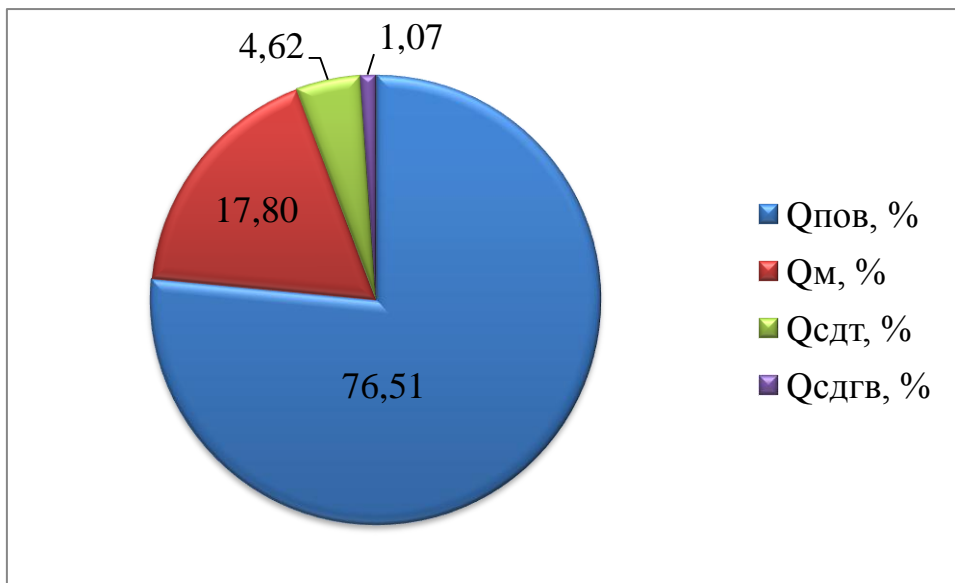


Рис. 3.18. Втрати і витрати теплоти в колекторі сонячної енергії впродовж початкових 15 хв (приклад 3.1, $L = 1300 \text{ м}^3/\text{год}$)

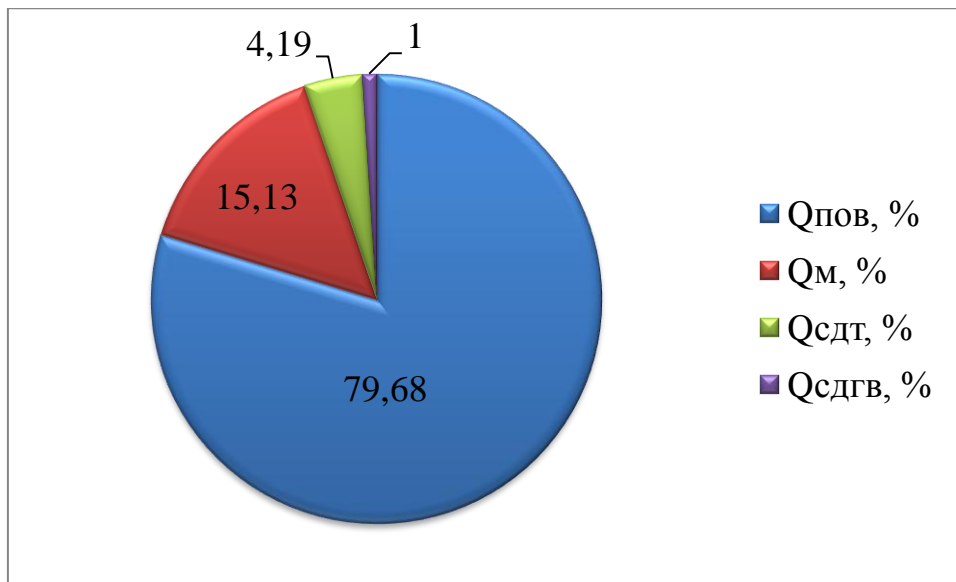


Рис. 3.19. Втрати і витрати теплоти в колекторі сонячної енергії впродовж початкових 15 хв (приклад 3.1, $L = 1800 \text{ м}^3/\text{год}$)

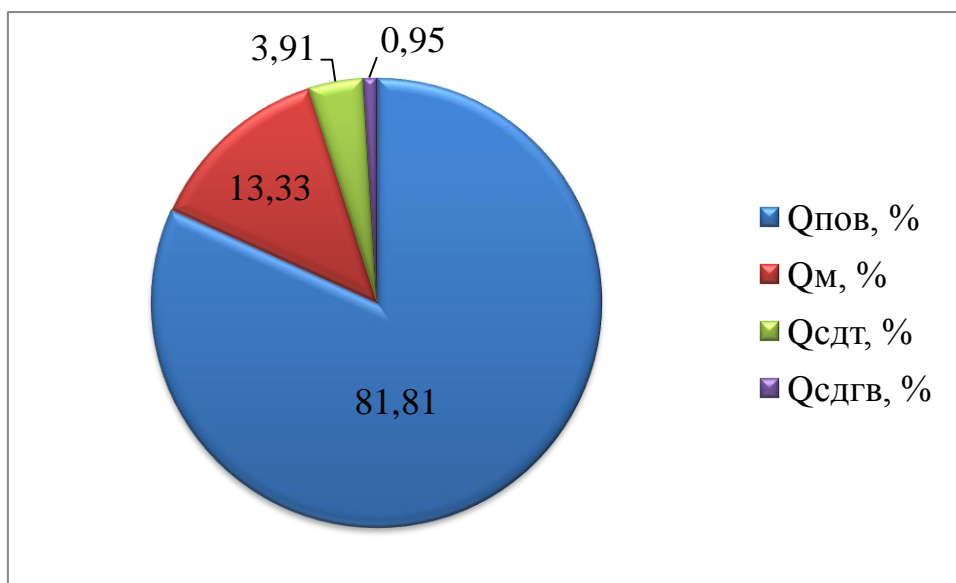


Рис. 3.20. Втрати і витрати теплоти в колекторі сонячної енергії впродовж початкових 15 хв (приклад 3.1, $L = 2300 \text{ м}^3/\text{год}$)

При збільшенні кількості повітря, що проходить через колектор сонячної енергії, збільшується швидкість руху повітря та відповідно:

– збільшується інтенсивність передачі теплоти конвекцією від нагрітої металевої пластини до повітря;

– зменшується інтенсивність зростання температури повітря і т.ін.

Приклад 3.2. Досліджується плоский колектор сонячної енергії (рис. Б.1,а). Мета:

– порівняння інтенсивності нагрівання повітря в колекторі при різній витраті повітря L ;

– порівняння отриманих показників з відповідними показниками прикладу 3.1.

Вихідні дані прикладів 3.2 і 3.1 збігаються, за винятком такого: довжина теплосприймаючої металевої пластини дорівнює 2,0 м, ширина цієї пластини дорівнює 0,5 м; сумарна довжина горизонтальних конструктивних елементів, призначених для компонування складових світлопрозорого покриття, в цьому варіанті більша.

У таблиці 3.2 показано результати обчислення зміни температури повітря в колекторі сонячної енергії за перші 15 хв його використання в досліджуваних умовах.

Таблиця 3.2

Зміна температури повітря
в колекторі сонячної енергії (приклад 3.2)

$L, \text{ м}^3/\text{год}$	$t_{\text{ПВ}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{\text{ПВ}} - t_{\text{ПН}}, \text{ }^\circ\text{C}$
300	26,91	4,91
800	24,21	2,21
1300	23,44	1,44
1800	23,07	1,07
2300	22,85	0,85

На рис. 3.21 – 3.25 відображено втрати і витрати теплоти колектором сонячної енергії впродовж початкових 15 хв його використання за умов: $L = 300 \text{ м}^3/\text{год}$; $L = 800 \text{ м}^3/\text{год}$; $L = 1300 \text{ м}^3/\text{год}$; $L = 1800 \text{ м}^3/\text{год}$; $L = 2300 \text{ м}^3/\text{год}$ (приклад 3.2).

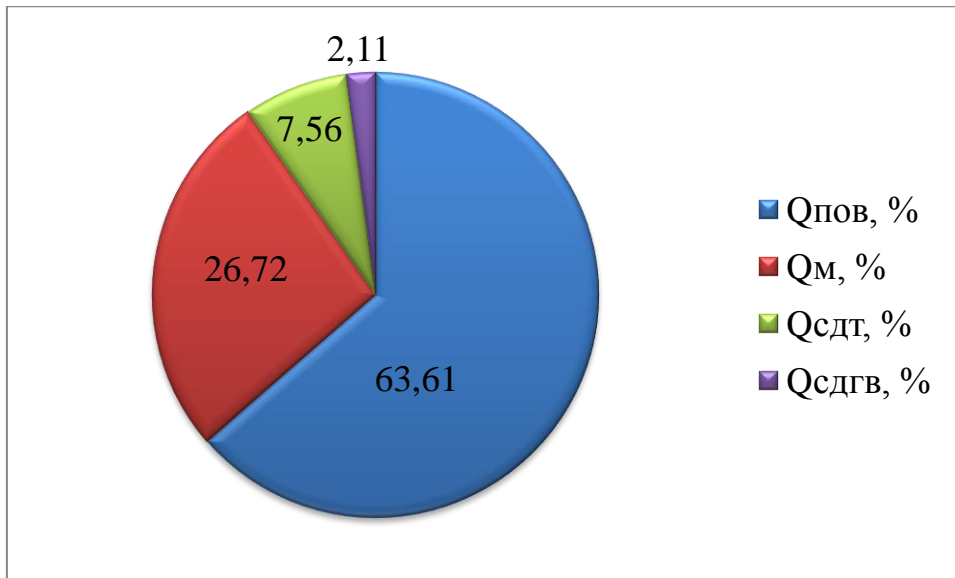


Рис. 3.21. Втрати і витрати теплоти в колекторі сонячної енергії впродовж початкових 15 хв (приклад 3.2, $L = 300 \text{ м}^3/\text{год}$)

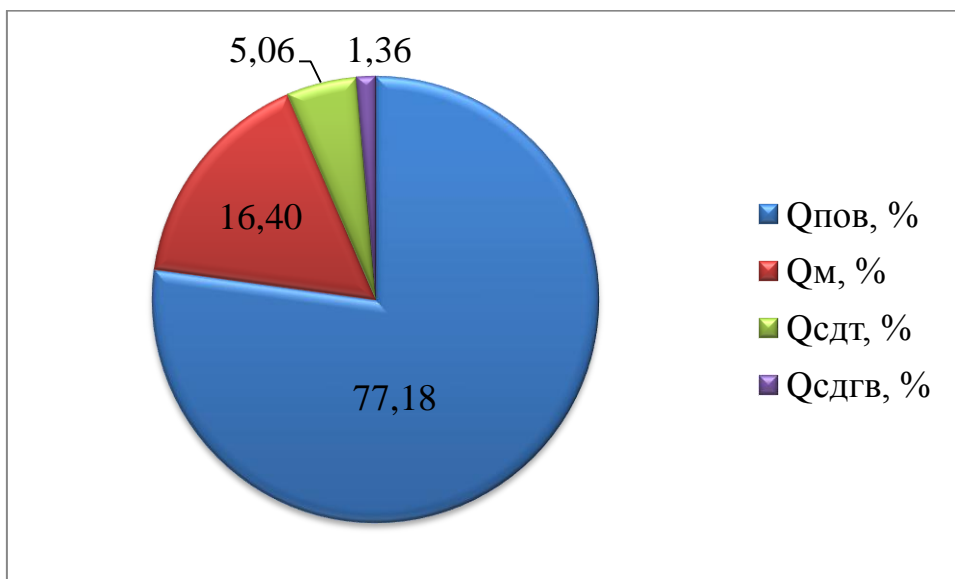


Рис. 3.22. Втрати і витрати теплоти в колекторі сонячної енергії впродовж початкових 15 хв (приклад 3.2, $L = 800 \text{ м}^3/\text{год}$)

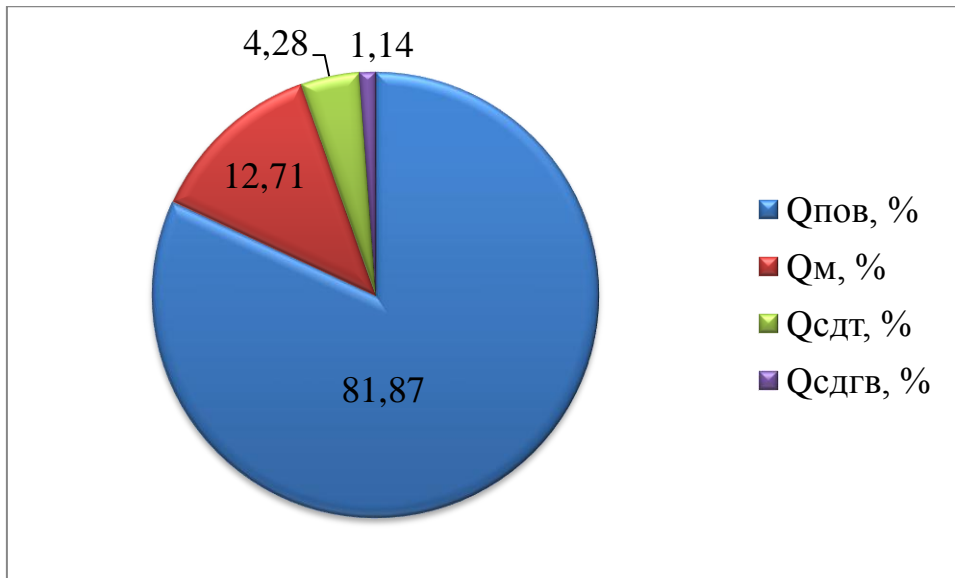


Рис. 3.23. Втрати і витрати теплоти в колекторі сонячної енергії впродовж початкових 15 хв (приклад 3.2, $L = 1300 \text{ м}^3/\text{год}$)

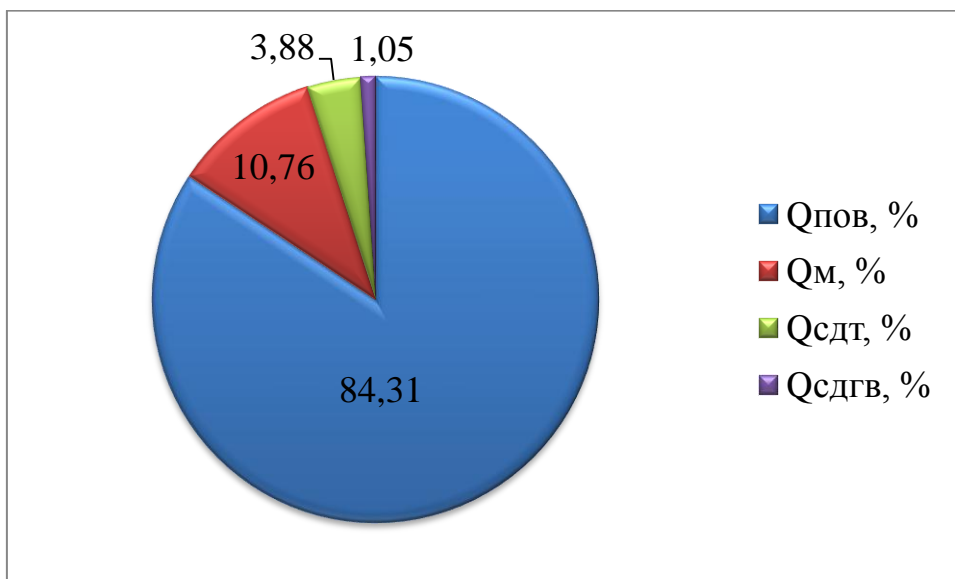


Рис. 3.24. Втрати і витрати теплоти в колекторі сонячної енергії впродовж початкових 15 хв (приклад 3.2, $L = 1800 \text{ м}^3/\text{год}$)

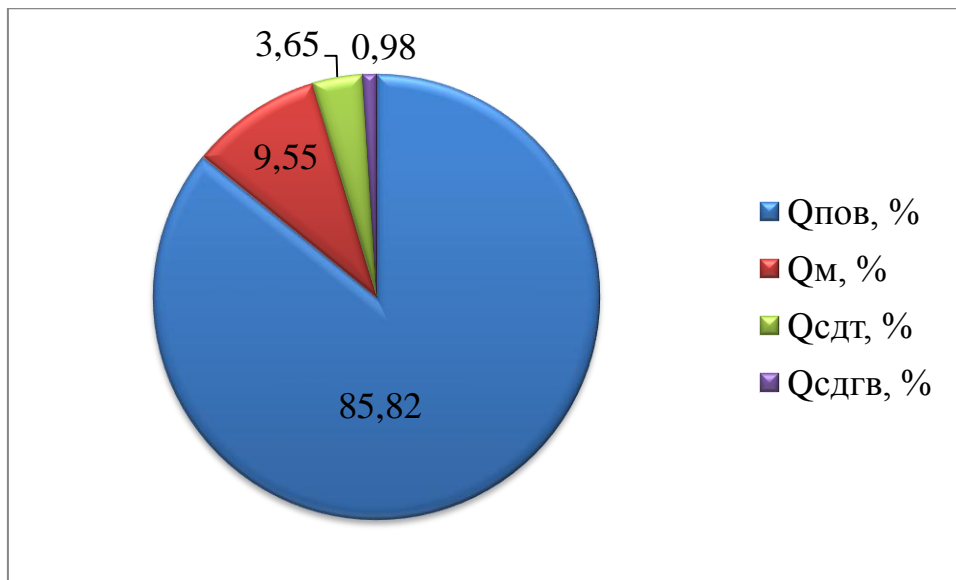


Рис. 3.25. Втрати і витрати теплоти в колекторі сонячної енергії впродовж початкових 15 хв (приклад 3.2, $L = 2300 \text{ м}^3/\text{год}$)

Збільшення кількості повітря, яке проходить через колектор сонячної енергії (приклад 3.2), обумовлює такі ж наслідки, що й у прикладі 3.1.

На рис. 3.26 відображено кількість теплоти $Q_{\text{пов}}$ (що витрачається на нагрівання повітря в колекторі сонячної енергії впродовж перших 15 хв) при різній витраті повітря L для прикладу 3.1 у відносному порівнянні: $Q_{\text{пов}} = 100\%$ при витраті повітря $L = 2300 \text{ м}^3/\text{год}$ для прикладу 3.2.

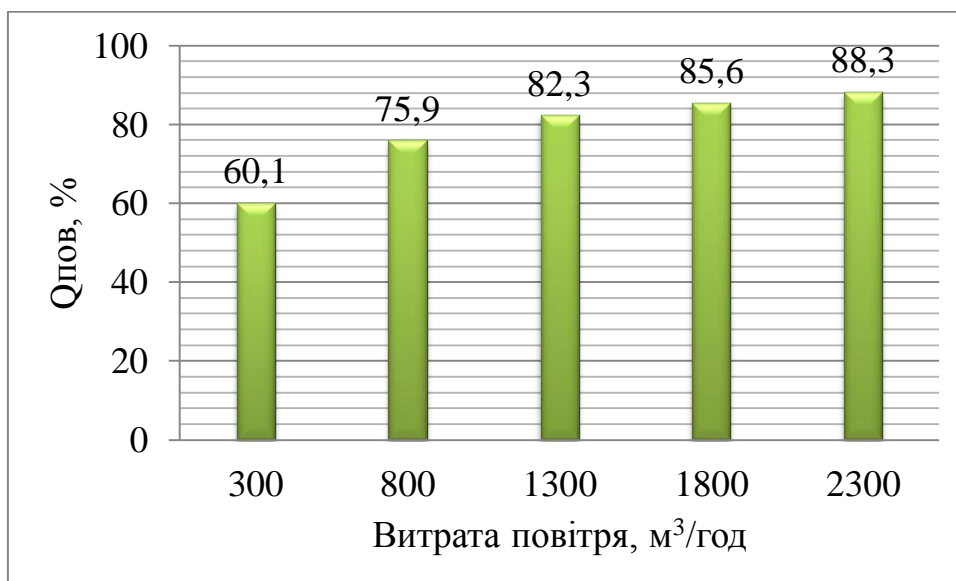


Рис. 3.26. Кількість теплоти $Q_{\text{пов}}$ для прикладу 3.1 у відносному порівнянні: $Q_{\text{пов}} = 100\%$ при витраті повітря $L = 2300 \text{ м}^3/\text{год}$ для прикладу 3.2

Площа теплосприймаючої металевої пластини колекторів сонячної енергії в прикладах 3.1 і 3.2 дорівнює $F = 1 \text{ м}^2$, але площа поперечного перерізу в колекторі прикладу 3.2 менша, ніж площа поперечного перерізу колектора в прикладі 3.1. Відповідно швидкість руху повітря в колекторі прикладу 3.2 більша, ніж у колекторі прикладу 4.1 (при рівній витраті повітря). Цей фактор обумовлює збільшення кількості теплоти $Q_{\text{пов}}$.

На рис. 3.26 відображено порівняння зміни температури повітря в плоскому колекторі сонячної енергії за початкові 15 хв для прикладів 3.1 та 3.2.

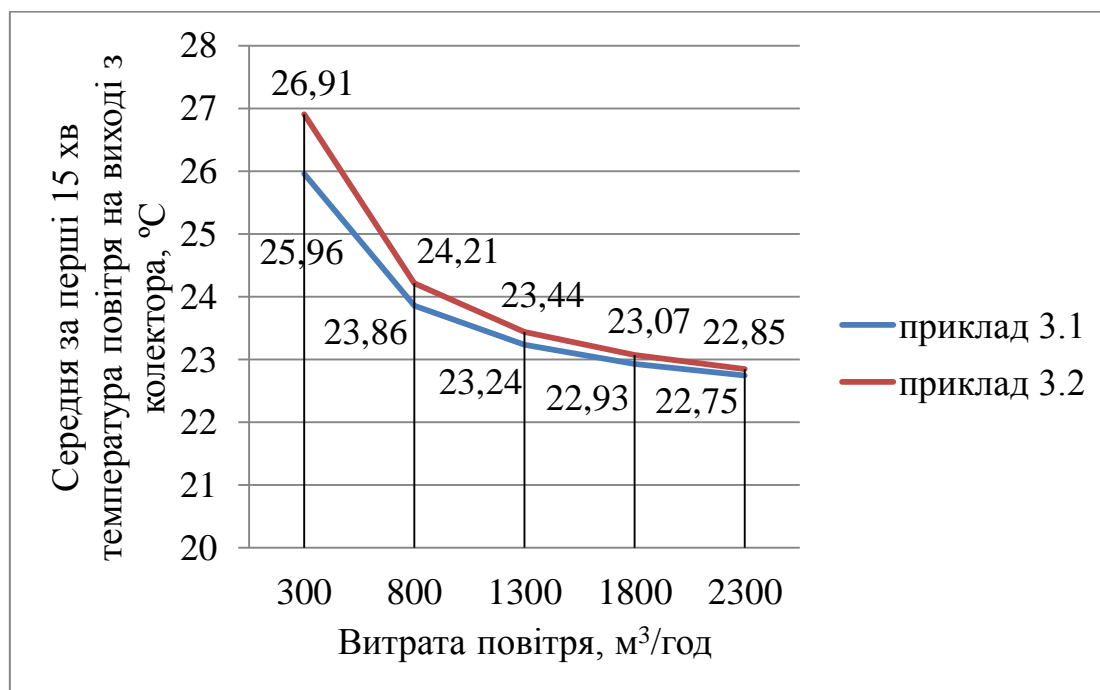


Рис. 3.27. Середня за початкові 15 хв температура повітря на виході з колекторі сонячної енергії, °C (приклади 3.1, 3.2)

За допомогою теплових балансів колектора сонячної енергії можна визначити вплив певних конструктивних рішень на інтенсивність нагрівання повітря.

Приклад 3.3. Визначається зміна температури гідроізольованих бетонних тротуарних плиток і повітря в тепловій камері при різній витраті нагрітого повітря.

Температура повітря на вході до теплової камери обумовлюється інтенсивністю нагрівання повітря в колекторі сонячної енергії (або в

повітронагрівачі) та зміною температури в повітропроводах. Різна витрата повітря призводить до різної інтенсивності зміни його температури в зазначеному устаткуванні. Тому в установці для теплової обробки бетонних виробів температура повітря на вході до теплової камери буде різною при різній витраті повітря.

Запропоновано на попередньому етапі досліджень здійснювати аналіз зміни температури бетонних тротуарних плиток і повітря в тепловій камері для початкового проміжку часу. Це дозволяє прийняти умовно однаковою середню за цей проміжок часу температуру повітря на вході до камери при різній витраті повітря. Такі випадки можливі, наприклад, якщо плоскі колектори сонячної енергії, котрі входять до складу установок, мають різну конструкцію.

В обчисленнях прийнято:

- тривалість розрахункового інтервалу часу становить 15 хв (пояснення стосовно вибору інтервалу часу наведено в підрозділі 3.2.4);
- спосіб гідроізоляції бетонних тротуарних плиток відображено на рис. 2.3, 3.11;
- сумарна маса бетону в камері дорівнює 298,1 кг;
- початкова (до теплової обробки) температура гідроізольованих бетонних тротуарних плиток становить $t_{БСП} = 20^{\circ}\text{C}$; початкова температура конструкцій, що огорожують камеру, дорівнює вказаній температурі;
- середня за перший проміжок часу температура повітря, що надходить до камери $t_{ПП} = 23^{\circ}\text{C}$;
- унаслідок порівняно невеликих розмірів камери в ній не розміщуються повітропроводи для подачі та відбору повітря.

Визначено методом ітерацій:

- середню температуру гідроізольованих бетонних тротуарних плиток наприкінці першого проміжку часу $t_{БСК}$; середню за перший проміжок часу температуру повітря $t_{ПК}$, яке видаляється з камери (табл. 3.3);
- кількість теплоти $Q_{БС}$, що витрачається на нагрівання гідроізольованих блоків бетонних виробів упродовж перших 15 хв.

У таблиці 3.3 також відображено: кількість повітря, що циркулює в установці, L , $\text{м}^3/\text{год}$; зміну температури гідроізольованих бетонних тротуарних плиток упродовж першого проміжку часу ($t_{\text{БСК}} - t_{\text{БСП}}$), $^{\circ}\text{C}$; інтенсивність охолодження в камері повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії ($t_{\text{ПП}} - t_{\text{ПК}}$), $^{\circ}\text{C}$; середню за перший проміжок часу температуру повітря в камері $t_{\text{П}}$, $^{\circ}\text{C}$.

Таблиця 3.3

Результати обчислення
зміни температури бетонних тротуарних плиток
та повітря в камері впродовж перших 15 хв роботи установки

L , $\text{м}^3/\text{год}$	$t_{\text{БСК}}$, $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{БСК}} - t_{\text{БСП}}$, $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{ПК}}$, $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{ПП}} - t_{\text{ПК}}$, $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{П}}$, $^{\circ}\text{C}$
300	20,70	0,7	21,21	1,79	22,105
800	21,13	1,13	21,66	1,34	22,330
1300	21,42	1,42	21,91	1,09	22,455
1800	21,63	1,63	22,07	0,93	22,535
2300	21,78	1,78	22,19	0,81	22,595

На рис. 3.28 відображено порівняння кількості теплоти $Q_{\text{БС}}$, що витрачається на нагрівання гідроізольованих блоків бетонних виробів упродовж перших 15 хв за умови, що $Q_{\text{БС}} = 100\%$ при $L = 2300 \text{ м}^3/\text{год}$.

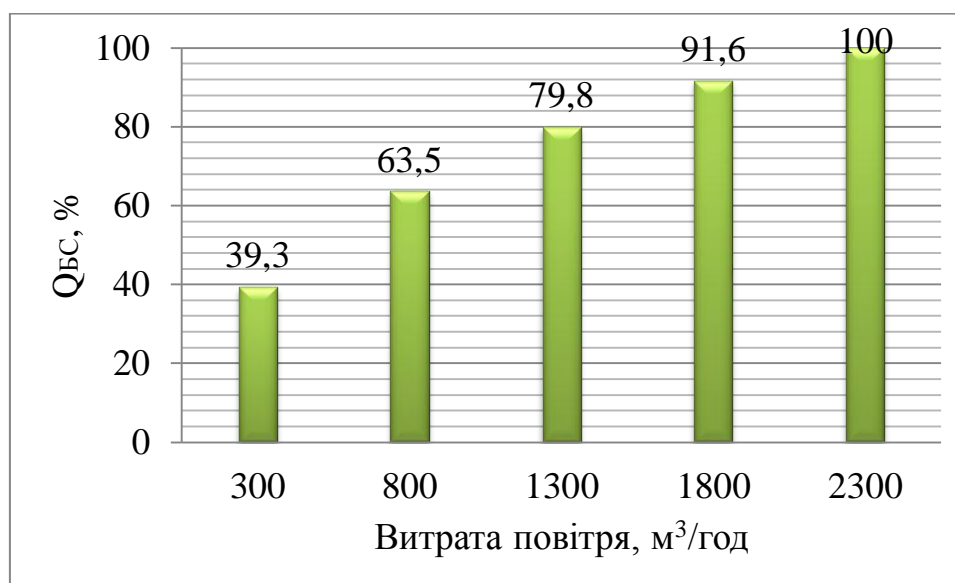


Рис. 3.28. Порівняння кількості теплоти $Q_{\text{БС}}$

При збільшенні кількості повітря, що проходить через теплову камеру (за умови однакової температури повітря на вході до камери), інтенсивність нагрівання бетонних виробів збільшується. У цьому випадку інтенсивність зниження температури повітря в камері зменшується, відповідно бетонні вироби нагріваються більш рівномірно в напрямку руху потоку повітря.

За допомогою теплових балансів камери можна визначити вплив певних конструктивних рішень на інтенсивність нагрівання бетонних виробів.

Приклад 3.4. Визначається зміна температури бетонних тротуарних плиток і повітря при їх тепловій обробці нагрітим у колекторі сонячної енергії повітрям. Прийнято:

- спосіб гідроізоляції бетонних тротуарних плиток відображено на рис. 2.3, 3.11;
- сумарна маса бетону в камері дорівнює 279,5 кг;
- початкова (до теплової обробки) температура гідроізолюваних бетонних тротуарних плиток становить $t_{\text{БСП}} = 20^{\circ}\text{C}$; початкова температура конструкцій, що огорожують камеру, дорівнює вказаній температурі;
- кількість повітря, що циркулює в установці, $L = 1880 \text{ м}^3/\text{год}$;
- довжина та ширина теплосприймаючої металевої пластини дорівнюють 1 м ($F = 1 \text{ м}^2$);
- кліматичні умови – місто Полтава, червень (за ясного неба).

Прийнято: на частину поверхонь повітропроводів потрапляє сонячна енергія; втрати теплоти в повітропроводах компенсуються цими надходженнями теплоти. Відповідно нехтують зміною температури в повітропроводах, які з'єднують колектор сонячної енергії та камеру для теплової обробки бетонних виробів. Тоді: середня за кожний проміжок часу температура повітря $t_{\text{ПВ}}$, котре видаляється з колектора сонячної енергії, дорівнює середній за цей проміжок часу температурі повітря $t_{\text{ПН}}$, яке надходить до теплової камери; середня за кожний проміжок часу температура повітря $t_{\text{ПК}}$, котре видаляється з камери, дорівнює середній за цей проміжок часу температурі повітря, яке надходить до колектора сонячної енергії $t_{\text{ПН}}$.

Унаслідок порівняно невеликої продуктивності камери в ній не розміщуються повітропроводи для подачі та відбору повітря.

Визначено методом ітерацій:

- середню температуру гідроізольованих бетонних тротуарних плиток $t_{\text{БСК}}$ наприкінці 15, 30, 45 та 60 хв роботи установки;
- середню за кожний указаний проміжок часу температуру повітря $t_{\text{ПК}}$, котре видаляється з камери (табл. 3.4).

У таблиці 3.4 також відображено: середню за кожний проміжок часу температуру повітря, що надходить до камери $t_{\text{ПП}}$, °С; зміну температури гідроізольованих бетонних тротуарних плиток упродовж кожного проміжку часу ($t_{\text{БСК}} - t_{\text{БСП}}$); середню за кожний проміжок часу зміну температури повітря в тепловій камері ($t_{\text{ПП}} - t_{\text{ПК}}$); середню за кожний проміжок часу температуру повітря в камері $t_{\text{П}}$.

Таблиця 3.4

Результати обчислення прикладу 3.4

$\Delta\tau$, год	$\sum\Delta\tau$, год	$t_{\text{БСП}}$, °С	$t_{\text{БСК}}$, °С	$t_{\text{БСК}} - t_{\text{БСП}}$, °С		$t_{\text{ПП}}$, °С	$t_{\text{ПК}}$, °С	$t_{\text{ПП}} - t_{\text{ПК}}$, °С	$t_{\text{П}}$, °С
				для $\Delta\tau$, год	для $\sum\Delta\tau$, год				
0,25	0,25	20,0	22,21	2,21	2,21	24,00	22,90	1,10	23,450
0,25	0,50	22,21	24,40	2,19	4,40	26,18	25,07	1,11	25,625
0,25	0,75	24,40	26,57	2,17	6,57	28,34	27,22	1,12	27,780
0,25	1,00	26,57	28,72	2,15	8,72	30,47	29,34	1,13	29,905

Обчислення показали, що впродовж першої години теплової обробки середня температура гідроізольованих блоків бетонних виробів підвищується на 8,72 °С.

Витрата електроенергії (обумовлена використанням вентилятора) для теплової обробки бетонних тротуарних плиток повітрям, нагрітим у колекторі

сонячної енергії, становить близько 0,01% від кількості теплоти, потрібної для здійснення цього процесу. Відповідно 99,99% енергії в досліджуваному процесі отримано внаслідок використання сонячної енергії та теплоти гідратації цементу.

Приклад 3.5. Визначається зміна температури бетонних тротуарних плиток і повітря при їх тепловій обробці нагрітим у колекторі сонячної енергії повітрям. Прийнято: сумарна маса бетону в камері дорівнює 496,8 кг; у колекторі сонячної енергії бокові сторони та днище теплоізовані; їх внутрішні поверхні – металеві (рис. Б.2,б); довжина та ширина світлопрозорого покриття (скла) дорівнюють відповідно 1,5 та 1 м ($F = 1,5 \text{ м}^2$);

інші пояснення наведено в прикладі 3.4.

У таблиці 3.5 відображено ті ж величини, що й у таблиці 3.4.

Таблиця 3.5

Результати обчислення прикладу 3.5

$\Delta\tau$, год	$\sum\Delta\tau$, год	$t_{\text{БСП}}$, °C	$t_{\text{БСК}}$, °C	$t_{\text{БСК}} - t_{\text{БСП}}$, °C		$t_{\text{ПП}}$, °C	$t_{\text{ПК}}$, °C	$t_{\text{ПП}} - t_{\text{ПК}}$, °C	$t_{\text{П}}$, °C
				для $\Delta\tau$, год	для $\sum\Delta\tau$, год				
0,25	0,25	20	21,64	1,64	1,64	21,98	23,46	1,48	22,72
0,25	0,50	21,64	23,25	1,61	3,25	23,54	25,04	1,50	24,29
0,25	0,75	23,25	24,82	1,57	4,82	25,01	26,52	1,51	25,765
0,25	1,00	24,82	26,35	1,53	6,35	26,21	27,73	1,52	26,97

Обчислення показали, що впродовж першої години теплової обробки середня температура гідроізованних бетонних тротуарних плиток підвищується на 6,35 °C.

Витрата електроенергії (обумовлена використанням вентилятора) для теплової обробки бетонних тротуарних плиток повітрям, нагрітим у колекторі

сонячної енергії, становить близько 0,01% від кількості теплоти, потрібної для здійснення цього процесу. Відповідно 99,99% енергії в досліджуваному процесі отримано внаслідок використання сонячної енергії та теплоти гідратації цементу.

Підсумки:

1. Проаналізовано (за досліджуваних умов):

– інтенсивність нагрівання повітря в плоскому колекторі сонячної енергії власної конструкції при різній витраті повітря та при певних конструктивних змінах у колекторі;

– зміну температури бетонних тротуарних плиток і повітря в тепловій камері для теплової обробки бетонних виробів нагрітим повітрям;

– інтенсивність зміни температури бетонних тротуарних плиток та повітря в установці для теплової обробки бетонних виробів нагрітим повітрям.

2. Остаточне рішення стосовно:

– встановлення оптимальної кількості повітря, що циркулює в установці для теплової обробки бетонних чи залізобетонних виробів;

– конструктивних особливостей плоского колектора сонячної енергії;

– конструктивних особливостей теплової камери, повітропроводів;

потрібно приймати після:

– сумісного аналізу всіх теплових балансів установки, складених для періоду теплової обробки бетонних виробів;

– проведення відповідних експериментальних досліджень;

– аналізу економічних показників.

3.2.8. Теплові баланси камер при термосному твердненні бетонних або залізобетонних виробів після припинення подачі нагрітого повітря

Розглядається теплообмін у камерах у період термосного тверднення бетонних чи залізобетонних виробів після припинення подачі нагрітого повітря. Спосіб гідроізоляції цих виробів показано на рис. 2.3, 3.11.

Теплова обробка бетонних виробів нагрітим повітрям може бути різної тривалості та інтенсивності. Тому після припинення подачі повітря в камеру інтенсивність надходження теплоти внаслідок гідратації цементу є різною. Цей фактор необхідно враховувати в теплових балансах камери.

Розглядається тепловий баланс надземної камери при термосному твердненні бетонних або залізобетонних виробів (після припинення теплової обробки нагрітим повітрям) за умов:

– упродовж досліджуваного періоду надходження теплоти внаслідок гідратації цементу порівняно неінтенсивні і не враховуються в тепловому балансі;

– теплова камера не розділяється на температурні зони, тобто визначається середня температура бетонних виробів.

Тепловий баланс надземної камери для i -го проміжку часу має вигляд

$$Q_B + Q_{AP} + Q_F + Q_{GM} + Q_O + Q_{\Pi} = Q_C + Q_{\Pi P} + Q_{\Pi D} + Q_{CH} + Q_{\Pi H} + Q_{GR}, \quad (3.143)$$

де Q_B , Q_{AP} , Q_F , Q_{GM} , Q_O , Q_{Π} – зміна тепловмісту впродовж i -го проміжку часу відповідно бетонних виробів, арматури (для залізобетонних виробів), форм, кришок або гідроізоляційного матеріалу, обладнання, на яке опираються форми, повітропроводів (за умови їх наявності), Дж;

Q_C , $Q_{\Pi P}$, $Q_{\Pi D}$ – витрати теплоти впродовж i -го проміжку часу на нагрівання відповідно стінок, кришки, підлоги (днища) камери, Дж;

Q_{CH}, Q_{PH} – втрати теплоти в навколишнє середовище крізь стінки та кришку камери впродовж i -го проміжку часу, Дж (за умови наявності цих втрат теплоти в i -й проміжок часу);

Q_{GR} – витрати теплоти часу на нагрівання ґрунту впродовж i -го проміжку часу, Дж (за умови наявності цих втрат теплоти в i -й проміжок часу).

Розглядається тепловий баланс камери при термосному твердненні бетонних або залізобетонних виробів (після припинення теплової обробки нагрітим повітрям) за умов:

– упродовж досліджуваного періоду надходження теплоти внаслідок гідратації цементу порівняно інтенсивні і їх ураховують у теплових балансах;

– теплова камера умовно поділяється на температурні зони: верхню, проміжну та нижню.

Тепловий баланс надземної камери для i -го проміжку часу має вигляд

$$Q_E = Q_B + Q_{AP} + Q_F + Q_{GM} + Q_O + Q_{PI} + Q_C + Q_{PR} + Q_{PD} + Q_{CH} + Q_{PH} + Q_{GR}, \quad (3.144)$$

де Q_E – кількість теплоти, що виділяється при гідратації цементу впродовж i -го проміжку часу, Дж.

Передача теплоти від нагрітих поверхонь форм з бетонними виробами до відповідних внутрішніх поверхонь конструкцій, що огороджують камеру, здійснюється внаслідок променевого теплообміну. Крім того, відбувається конвективний теплообмін між бетонними виробами й повітрям камери. Відповідно відбувається конвективний теплообмін між повітрям камери і внутрішньою поверхнею конструкцій, що огороджують камеру.

Верхній та нижній бетонні вироби охолоджуються швидше внаслідок особливих умов теплообміну з навколишнім середовищем. Створюється різниця між температурами виробів, яка обумовлює відповідний променевий теплообмін між поверхнями цих виробів та інтенсифікацію конвективного теплообміну в повітряних прошарках між цими виробами, і т.ін.

Тепловий баланс верхньої температурної зони надземної камери для і-го проміжку часу має вигляд:

$$Q_{EB} + Q_{RPB} + Q_{KBП} = Q_{BB} + Q_{AB} + Q_{FB} + Q_{GB} + Q_{OB} + \\ + Q_{PB} + Q_{CB} + Q_{PB} + Q_{CHB} + Q_{PH} + Q_{PBВ} + Q_{KBВ}; \quad (3.145)$$

– тепловий баланс нижньої температурної зони має вигляд:

$$Q_{EH} + Q_{RPH} + Q_{KHП} = Q_{BH} + Q_{AH} + Q_{FH} + Q_{GH} + Q_{OH} + \\ + Q_{PH} + Q_{CHH} + Q_{PD} + Q_{CHH} + Q_{PH} + Q_{PHВ} + Q_{KHВ}; \quad (3.146)$$

де Q_{EB} , Q_{EH} – кількість теплоти, що надходить до камери внаслідок гідратації цементу у верхньому та нижньому бетонних виробих упродовж і-го проміжку часу, Дж;

Q_{RPB} – кількість теплоти, що передається внаслідок наявності результуючого випромінювання від гідроізолюваної поверхні проміжного бетонного виробу до днища форми верхнього бетонного виробу впродовж і-го проміжку часу, Дж;

Q_{RPH} – кількість теплоти, що передається внаслідок наявності результуючого випромінювання від днища форми проміжного бетонного виробу до гідроізолюваної поверхні нижнього бетонного виробу впродовж і-го проміжку часу, Дж;

$Q_{KBП}$ – кількість теплоти, що передається внаслідок наявності конвективного теплообміну від повітря прошарку до днища форми верхнього виробу впродовж і-го проміжку часу, Дж; наявність цієї складової теплового балансу обумовлена тим, що температура проміжного бетонного виробу вища, ніж температура верхнього виробу, і відповідно температура повітря в прошарку між цими виробами вища, ніж температура верхнього виробу;

$Q_{KHП}$ – кількість теплоти, що передається внаслідок наявності конвективного теплообміну від повітря прошарку до гідроізолюваної поверхні нижнього виробу впродовж і-го проміжку часу, Дж; наявність цієї складової

теплого балансу обумовлена тим, що температура проміжного бетонного виробу вища, ніж температура нижнього виробу, і відповідно температура повітря в прошарку між цими виробами вища, ніж температура нижнього виробу;

Q_{AB} , Q_{AH} – витрати теплоти на нагрівання впродовж i -го проміжку часу арматури (для залізобетонного виробу) відповідно верхньої та нижньої температурних зон камери, Дж;

Q_{FB} , Q_{FH} – витрати теплоти на нагрівання впродовж i -го проміжку часу форми відповідно верхньої та нижньої температурних зон камери, Дж;

Q_{GB} , Q_{GH} – витрати теплоти на нагрівання впродовж i -го проміжку часу кришки або гідроізоляційного матеріалу відповідно верхньої та нижньої температурних зон камери, Дж;

Q_{OB} , Q_{OH} – витрати теплоти на нагрівання впродовж i -го проміжку часу обладнання, на яке опираються форми, відповідно верхньої та нижньої температурних зон камери, Дж;

Q_{PB} , Q_{PH} – витрати теплоти впродовж i -го проміжку часу на нагрівання повітропроводів, розташованих у верхній та нижній температурних зонах камери (за умови наявності повітропроводів), Дж;

Q_{SB} , Q_{SH} – витрати теплоти на нагрівання стінок камери відповідно верхньої та нижньої температурних зон камери впродовж i -го проміжку часу, Дж;

Q_{SNB} , Q_{SNH} – втрати теплоти в навколишнє середовище крізь стінки верхньої та нижньої температурних зон камери впродовж i -го проміжку часу (за умови наявності цих втрат теплоти в i -й проміжок часу), Дж;

Q_{PBV} – кількість теплоти, яку втрачає верхній бетонний виріб унаслідок наявності результуючого випромінювання між гідроізолюваною поверхнею виробу та поверхнею кришки камери впродовж i -го проміжку часу;

Q_{KBV} – кількість теплоти, яку втрачає верхній бетонний виріб внаслідок наявності конвективного теплообміну між гідроізолюваною поверхнею виробу та повітрям прошарку впродовж i -го проміжку часу;

$Q_{\text{РНВ}}$ – кількість теплоти, яку втрачає нижній бетонний виріб внаслідок наявності результуючого випромінювання між днищем форми цього виробу підлогою камери впродовж i -го проміжку часу;

$Q_{\text{КНВ}}$ – кількість теплоти, яку втрачає нижній бетонний виріб внаслідок наявності конвективного теплообміну між днищем форми цього виробу та підлогою камери впродовж i -го проміжку часу, Дж;

пояснення до величин $Q_{\text{ПР}}$, $Q_{\text{ПН}}$, $Q_{\text{ПД}}$, $Q_{\text{ГР}}$ відображено вище.

Тепловий баланс проміжних температурних зон складається за аналогією до наведених вище теплових балансів.

Підсумки. Розроблено теплові баланси камери при термосному твердненні бетонних і залізобетонних виробів після припинення подачі в камеру нагрітого повітря. Певні корегування цих теплових балансів обумовлюються різними початковими умовами, конструктивними особливостями камери й т.ін.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Розроблено математичні моделі процесів теплообміну в установках для теплової обробки в закритих формах бетонних та залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії або в повітронагрівачі, та теплоти гідратації цементу.

2. Створення вказаних математичних моделей надає можливість:

– аналізувати переваги та недоліки різних конструктивних варіантів плоских колекторів сонячної енергії власної конструкції; за необхідності вибирати колектор сонячної енергії, який зроблено в умовах серійного виробництва;

– аналізувати: переваги та недоліки різних конструктивних варіантів камер, які проектуються; доцільність упровадження заходів стосовно покращення теплотехнічних властивостей конструкцій, що огорожують камери (для існуючих камер);

- визначати оптимальну кількість повітря, що циркулює в установці;
- вибирати повітрянагрівач (повітрянагрівачі), вентилятор (вентилятори), повітропроводи і т.ін.;

- розвинути методику експериментально-розрахункових досліджень теплової обробки в закритих формах бетонних та залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії або в повітрянагрівачі, та теплоти гідратації цементу (див. розділ 2).

3. Проаналізовано для досліджуваних умов (приклади 3.1 – 3.5):

- вплив певних конструктивних рішень плоского колектора сонячної енергії власної конструкції на інтенсивність нагрівання повітря;

- вплив кількості повітря, що циркулює в установці, на інтенсивність нагрівання повітря в колекторі сонячної енергії та на інтенсивність нагрівання бетонних тротуарних плиток;

- інтенсивність нагрівання бетонних виробів в установках для теплової обробки бетонних тротуарних плиток повітрям, нагрітим в плоскому колекторі сонячної енергії власної конструкції.

4. З'ясовано, що витрата електроенергії (обумовлена використанням вентилятора) для теплової обробки бетонних тротуарних плиток повітрям, нагрітим у колекторі сонячної енергії, становить близько 0,01% від кількості теплоти, потрібної для здійснення цього процесу в досліджуваних умовах (приклади 3.4, 3.5).

5. Встановлено, що інтенсивність нагрівання бетонних тротуарних плиток повітрям, нагрітим в колекторі сонячної енергії в досліджуваних умовах є порівняно невеликою: упродовж першої години їх температура підвищилася на 8,7 та на 6,4°C (приклади 3.4, 3.5).

6. Зроблено попередні висновки стосовно застосування теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії або в повітрянагрівачі:

а) якщо у весняний, літній та осінній періоди року початкова температура бетонної суміші буде нижчою, ніж температура, яка відповідає нормальним

умовам тверднення вказаних виробів, то використання повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії або в повітронагрівачі, надає можливість підвищити температуру цих виробів упродовж першої години (перших годин) тверднення до зазначеної температури; надалі потрібно:

- або створити термосні умови тверднення бетонних (залізобетонних) виробів упродовж визначеного терміну з урахуванням того, що певний час буде відбуватися їх нагрівання внаслідок наявності екзотермічних реакцій гідратації цементу;
- або продовжити нагрівання (до певної температури) вказаних виробів за допомогою повітря, а вже потім забезпечити термосні умови їх тверднення упродовж визначеного проміжку часу;
- або розглянути можливість застосування ступінчастих температурних режимів тверднення цих виробів;

б) якщо у теплий період року початкова температура бетонної суміші буде вищою, ніж температура, яка відповідає нормальним умовам тверднення, то використання повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії або в повітронагрівачі, надає можливість інтенсифікувати процес тверднення бетонних (залізобетонних) виробів і підвищити оборотність форм порівняно з твердненням у нормальних умовах;

в) мінімальна початкова температура бетонної суміші, при якій доцільно застосовувати в холодний період року теплову обробку бетонних та залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в повітронагрівачі, визначається в кожному випадку окремо.

РОЗДІЛ 4

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ БЕТОННИХ ТА ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ВИРОБІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТЕПЛОТИ ГІДРАТАЦІЇ ЦЕМЕНТУ

4.1. Теоретичні передумови

Розглядається другий комбінований спосіб геліотермообки бетонних та залізобетонних виробів (рис. 2.2) у періоди, коли сонячна енергія не надходить до колектора, і їх теплова обробка здійснюється з використанням теплоти гідратації цементу.

Примітка. Тепловиділення при гідратації цементу наявне при всіх видах теплової та тепловологісної обробки бетонних і залізобетонних виробів. Досліджується теплова обробка цих виробів без використання теплоносія.

Інтенсивність тверднення бетонних і залізобетонних виробів залежить, зокрема, від температури, при якій відбувається зазначений процес. Ця температура обумовлюється (за інших рівних факторів) співвідношенням між надходженнями теплоти до камери й витратами теплоти в камері та втратами теплоти камерою.

Для теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із застосуванням тільки теплоти гідратації цементу можуть бути використані як існуючі камери, так і камери, спеціально розроблені для здійснення цього технологічного процесу.

Для збереження теплоти гідратації цементу доцільно використовувати теплоізоляційну конструкцію, якою накриваються вироби. У просторі між нижньою формою та днищем камери необхідно розмістити шар із теплоізоляційного матеріалу, котрий є складовою частиною теплоізоляційної конструкції. Указані рекомендації стосуються існуючих камер. У спеціально розроблених камерах огорожувальні конструкції повинні мати необхідні теплотехнічні властивості, які визначаються з урахуванням положень методики

моделювання процесів теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу.

Умовними теплоізоляційними шарами в камері є повітряні прошарки. Залежно від наявності чи відсутності цих повітряних прошарків змінюються відповідні граничні умови. У додатку В відображено кілька можливих варіантів спрощених схем теплових камер для встановлення граничних умов при обчисленні процесів теплообміну в них.

Температурний режим теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу обумовлюється низкою чинників, серед яких:

- кінетика теплоти гідратації цементу (яка взаємопов'язана з іншими факторами);

- склад бетону;

- модуль поверхні виробів;

- маса: тверднучих бетонних виробів; форм; устаткування, на яке форми опираються; обладнання камери, призначеного для розподілу теплоносія в період, коли прискорення тверднення виробів здійснюється з його використанням;

- теплофізичні властивості: тверднучих бетонних виробів; матеріалу форм; матеріалу устаткування, на яке форми опираються; матеріалу обладнання камери;

- початкова температура: бетонної суміші; форм та устаткування, на яке форми опираються; обладнання камери; конструкцій, що огорожують камеру; теплоізоляційної конструкції (за умови її наявності); повітря камери;

- температура повітря цеху;

- особливості технологічних процесів, які обумовлюють температуру в суміжних камерах (за умови наявності блока камер);

- теплотехнічні властивості: теплоізоляційної конструкції, якою накриваються вироби (за умови, що така конструкція застосовується); конструкцій, що огорожують камеру;

– конструктивні особливості камери.

Мета математичного моделювання процесів теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу – обчислення зміни температури складових досліджуваної системи.

Для вирішення поставленої задачі період, упродовж якого бетонні вироби тверднуть у камері, поділяється на певні проміжки часу. Для кожного із цих проміжків часу складається система рівнянь (теплових балансів). Кількість рівнянь у системі залежить від кількості температурних зон у камері (пояснення наведено в підрозділі 4.2).

З урахуванням наявності тепловиділення цементу при гідратації та масообміну між поверхнею виробу і повітрям камери диференціальне рівняння теплопровідності вигляд

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{q_v}{c_p} \pm \frac{r_w}{c_p}, \quad (4.1)$$

де r – прихована теплота фазового перетворення, Дж/кг;

w – об'ємна інтенсивність випаровування вологи, кг/(м³·с);

пояснення до інших складових цього рівняння наведено в поясненнях до рівняння (3.40).

Прийнято: інтенсивність масообміну між поверхнею виробів і повітрям камери незначна, тому її впливом на відповідні процеси теплообміну нехтують ($\frac{r_w}{c_p} \approx 0$).

За умови наявності в початковий період твердіння виробів інтенсивного масообміну між їх поверхнею і повітрям камери вироби гідроізольовують (як рекомендовано в патенті на корисну модель [196]); відповідно $\frac{r_w}{c_p} = 0$.

Додаткові пояснення стосовно масообміну між поверхнею виробів і повітрям камери наведено в підрозділі 4.4.

Однією з особливостей способу теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу є те, що

зміна їх температури в зазначеному процесі заздалегідь невідома. Слід підкреслити, що застосування теплоносія при тепловій обробці вказаних виробів забезпечує певний температурний режим їх тверднення.

Оскільки інтенсивність тепловиділення цементу залежить (за інших рівних факторів) від температури бетону (кінетика зміни якої попередньо невідома), то в обчисленнях прийнято спрощення: тепловиділення цементу враховується не в диференціальному рівнянні теплопровідності, а в теплових балансах камери. Тоді використовується диференціальне рівняння теплопровідності (3.43)

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t.$$

Граничні умови третього роду наявні:

- на поверхнях виробів і форм (рис. В.1 – В.6);
- на внутрішніх поверхнях стінок, кришки та частини днища камери при існуванні відповідних повітряних прошарків (наприклад, рис. В.1 – В.4);
- на зовнішніх поверхнях прогрітих надземних частин стінок заглибленої камери (для надземної камери – на зовнішніх поверхнях стінок) та на зовнішній поверхні прогрітої кришки камери;
- на внутрішніх поверхнях теплоізоляційної конструкції при існуванні відповідних повітряних прошарків (наприклад, рис. В.3 – В.6);
- на зовнішніх поверхнях теплоізоляційної конструкції при існуванні відповідних повітряних прошарків (наприклад, рис. В.3, В.4).

Закон теплообміну (3.45):

$$q = \alpha_k (t_{c1} - t_n) + \alpha_{np} (t_{c1} - t_{c2}).$$

Якщо товщини вертикальних повітряних прошарків між поверхнями теплообміну в камері є невеликими, то в цих прошарках виникають циркуляційні контури. Рекомендації стосовно визначення густини теплового потоку в замкнутих повітряних прошарках наведено, зокрема, в джерелах

[79, 165]. Слід підкреслити, що повітряні прошарки в камері не є замкнутими, що необхідно враховувати.

Граничні умови четвертого роду (3.47)

$$\lambda_1 \left(\frac{\partial t_1}{\partial n} \right)_c = \lambda_2 \left(\frac{\partial t_2}{\partial n} \right)_c.$$

Граничні умови четвертого роду наявні при відповідному прогріванні: на зовнішніх поверхнях підземних частин стінок камери; на зовнішній поверхні днища камери; на межі шарів в багатошарових конструкціях, що огороджують камеру; на межі теплоізоляційної конструкції та поверхонь теплообміну, з якими вона стикається.

Пояснення стосовно температурного поля конструкцій, що огороджують камеру, відображено в пунктах 3.2.1, 3.2.4.

Нижче наведено основні спрощення, які застосовуються при обчисленні зміни температури бетонних і залізобетонних виробів під час їх теплової обробки з використанням теплоти гідратації цементу.

Перше спрощення: тепловиділення цементу враховується не в диференціальному рівнянні теплопровідності, а в теплових балансах камери (пояснення наведено в цьому пункті вище).

Друге спрощення: загальний термін, упродовж якого відбувається нагрівання виробів, ділиться на проміжки часу тривалістю Δt . Визначення максимального проміжку часу $\Delta t_{\text{макс}}$ запропоновано здійснювати згідно з рекомендаціями, наведеними в підрозділі 3.2.4.

Третє спрощення: обчислення температурного поля може бути здійснено: плит та панелей – як необмежених пластин [151, 152, 161, 164, 283, 303]; балок (і т. ін.) – як нескінченних циліндрів [151, 152, 161].

Тоді для виробів, що мають форму пластини, застосовується диференціальне рівняння теплопровідності (3.44)

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}.$$

Розв'язання вказаного диференціального рівняння теплопровідності (з урахуванням умов однозначності для необмеженої пластини) наведено, зокрема, в джерелах [77, 133, 135, 144, 152, 162, 259, 292, 311].

Нижче відображено залежності для обчислення (з урахуванням рекомендацій вказаних джерел) кількості теплоти, яку сприймає (або втрачає в період термосного тверднення) виріб, що має форму пластини, впродовж і-го проміжку часу внаслідок конвективного теплообміну. Урахування променевого теплообміну відбувається з використанням окремої складової у відповідних теплових балансах (див. підрозділ 4.2).

Примітка. У наведених нижче формулах ураховується п'ять спрощення. Досліджувана система: бетонний або залізобетонний виріб і форма (використовується назва системи «бетонний (залізобетонний) виріб»).

Якщо в початковий термін тверднення бетонних (залізобетонних) виробів (чи впродовж усього терміну їх тверднення в камері) температура конструкцій, що огороджують камеру, вища, ніж температура тверднучих виробів (відповідно температура повітря камери в цей термін вища, ніж температура виробів), то кількість теплоти, Дж, яку сприймає виріб (котрий має форму пластини) впродовж і-го проміжку часу внаслідок конвективного теплообміну, розраховується за залежністю (3.48)

$$Q = 2\delta F \rho c (\overline{t_{\text{впк}}} - t_{\text{впп}}).$$

Кількість теплоти, Дж, яку втрачає бетонний виріб (що має форму пластини) впродовж і-го проміжку часу внаслідок конвективного теплообміну, розраховується за формулою (3.52)

$$Q = 2\delta F \rho c (t_{\text{впп}} - \overline{t_{\text{влк}}}).$$

Четверте спрощення стосується використання залежностей для визначення кількості теплоти Q , Дж, яку віддає матеріал в навколишнє середовище (або сприймає від навколишнього середовища) за певний проміжок часу, наведених, зокрема, в джерелах [30, 181, 182, 263].

Нижче відображено залежності для обчислення (з урахуванням рекомендацій указаних джерел) кількості теплоти, яку сприймає (або втрачає) бетонний виріб упродовж i -го проміжку часу внаслідок конвективного теплообміну. Визначення впливу променевого теплообміну відбувається з використанням окремої складової у відповідних теплових балансах (див. підрозділ 4.2).

Кількість теплоти, Дж, яку сприймає бетонний виріб унаслідок конвективного теплообміну впродовж i -го проміжку часу, можна визначити за формулою (3.56)

$$Q = c m (t_n - t_{вп}) \beta_C.$$

Кількість теплоти, Дж, яку втрачає бетонний виріб унаслідок конвективного теплообміну впродовж i -го проміжку часу, можна визначити за формулою (3.57)

$$Q = c m (t_{вп} - t_n) \beta_B.$$

П'яте спрощення. Необхідність застосування цього спрощення обумовлена тим, що виріб нагрівається або охолоджується разом з формою.

Запропоновано:

– приймати середньозважені значення величин λ , c , ρ для досліджуваної системи;

– визначати середню температуру досліджуваної системи.

Шосте спрощення: обчислення теплообміну між поверхнею тверднучого у формі бетонного чи залізобетонного виробу та навколишнім середовищем здійснюється з урахуванням середньої температури цієї системи.

Сьоме спрощення стосується тепло- і масообміну між поверхнею виробу та повітрям камери (пояснення наведено на початку цього пункту, додаткові пояснення відображено в підрозділі 4.4).

Підсумки:

1. Наведено диференціальні рівняння теплопровідності та граничні умови для процесів теплообміну при тепловій обробці тверднучих у тепловій камері бетонних або залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу.

2. Відображено основні спрощення, які застосовуються при обчисленні зміни температури бетонних та залізобетонних виробів під час їх теплової обробки в досліджуваних умовах.

4.2. Теплові баланси виробничих камер

Розглядаються процеси теплообміну під час теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів в окремо розташованих виробничих камерах із використанням теплоти гідратації цементу.

Прийнято, що інтенсивність масообміну між поверхнею виробів і повітрям камери незначна, тому її впливом на відповідні процеси теплообміну нехтують (див. підрозділи 4.1, 4.4).

При тепловій обробці бетонних та залізобетонних виробів верхня й нижня форми з виробами знаходяться в особливих умовах стосовно теплообміну з навколишнім середовищем.

Припустимо, що початкова (для процесу теплової обробки) температура сформованих виробів однакова. Через певний проміжок часу:

– температура верхньої форми з виробом буде відрізнятися від температури форми з виробом, розташованої нижче, і між ними буде відбуватися теплообмін;

– температура нижньої форми з виробом буде відрізнятися від температури форми з виробом, розташованої вище, і між ними буде відбуватися теплообмін;

– зміна температури вказаних проміжних форм призведе до зміни температури інших проміжних форм.

Тобто температура бетонних і залізобетонних виробів під час теплової обробки з використанням теплоти гідратації цементу залежить від місця їх розташування в камері.

Крім того, при формуванні та завантаженні до камери цих виробів може відбуватися зміна їх температури [99].

Обчислення процесів теплообміну в камері в період теплової обробки бетонних або залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу здійснюється відповідно до одного з трьох випадків.

1) Мета обчислень – визначення зміни середньої температури досліджуваної системи впродовж терміну теплової обробки бетонних або залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу.

До складу досліджуваної системи входять: бетонні чи залізобетонні вироби, розміщені в камері; форми; устаткування, на яке опираються форми.

У цьому випадку нехтують різницею між температурами верхнього, проміжних та нижнього виробів. Тобто теплова камера на температурні зони не поділяється. Указане спрощення доцільно застосовувати за таких умов:

– наявна додаткова теплоізоляційна конструкція (див. рис. В.3 – В.6) або теплотехнічні властивості конструкцій, що огорожують камеру, дозволяють застосувати вказане спрощення;

– початкова температура виробів, завантажених до камери, однакова або відрізняється незначно.

2) Мета обчислень – визначення зміни середньої температури кожної з досліджуваних систем трьох температурних зон камери впродовж терміну теплової обробки бетонних чи залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу (рис. 4.1).

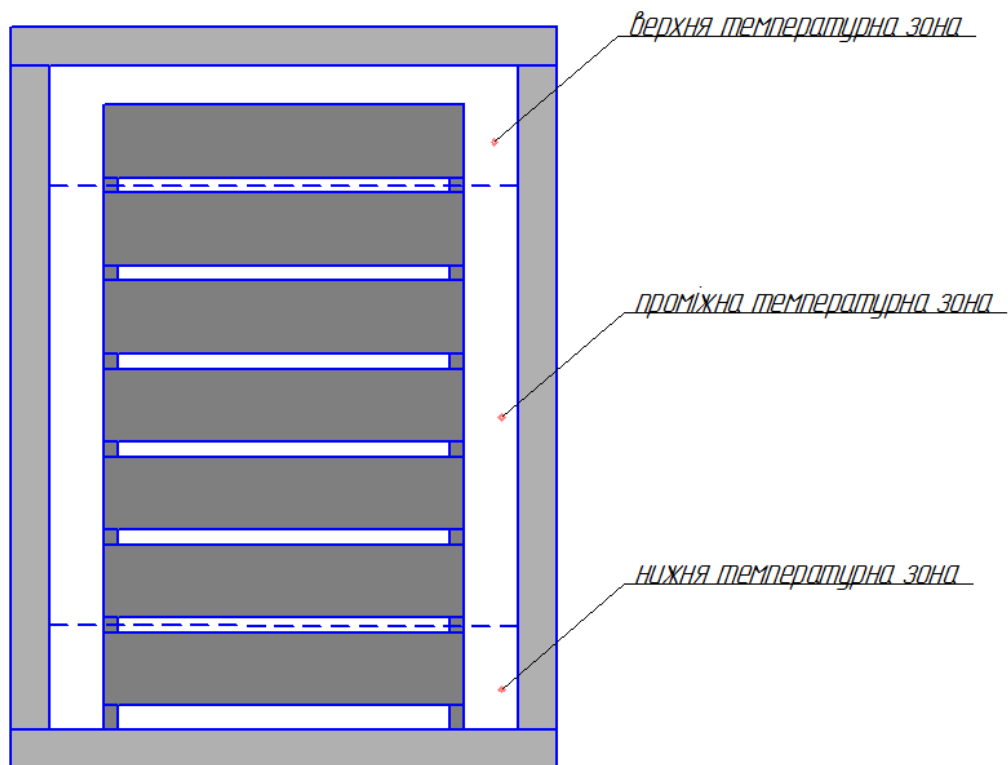


Рис. 4.1. Умовне розділення камери на три температурні зони

До складу досліджуваної системи верхньої температурної зони входять: верхній бетонний або залізобетонний виріб, форма та устаткування, на яке опирається форма.

До складу досліджуваної системи нижньої температурної зони входять: нижній бетонний чи залізобетонний виріб, форма й устаткування, на котре опирається форма.

До складу досліджуваної системи проміжної температурної зони входять усі інші бетонні або залізобетонні вироби, форми та устаткування, на яке опираються форми. У цьому випадку нехтують різницею між температурами проміжних виробів.

3) Мета обчислень – визначення зміни середньої температури кожної з досліджуваних систем (кількість яких відповідає кількості бетонних чи залізобетонних виробів, що тверднуть у камері) впродовж терміну теплової обробки цих виробів із використанням теплоти гідратації цементу (рис. 4.2).

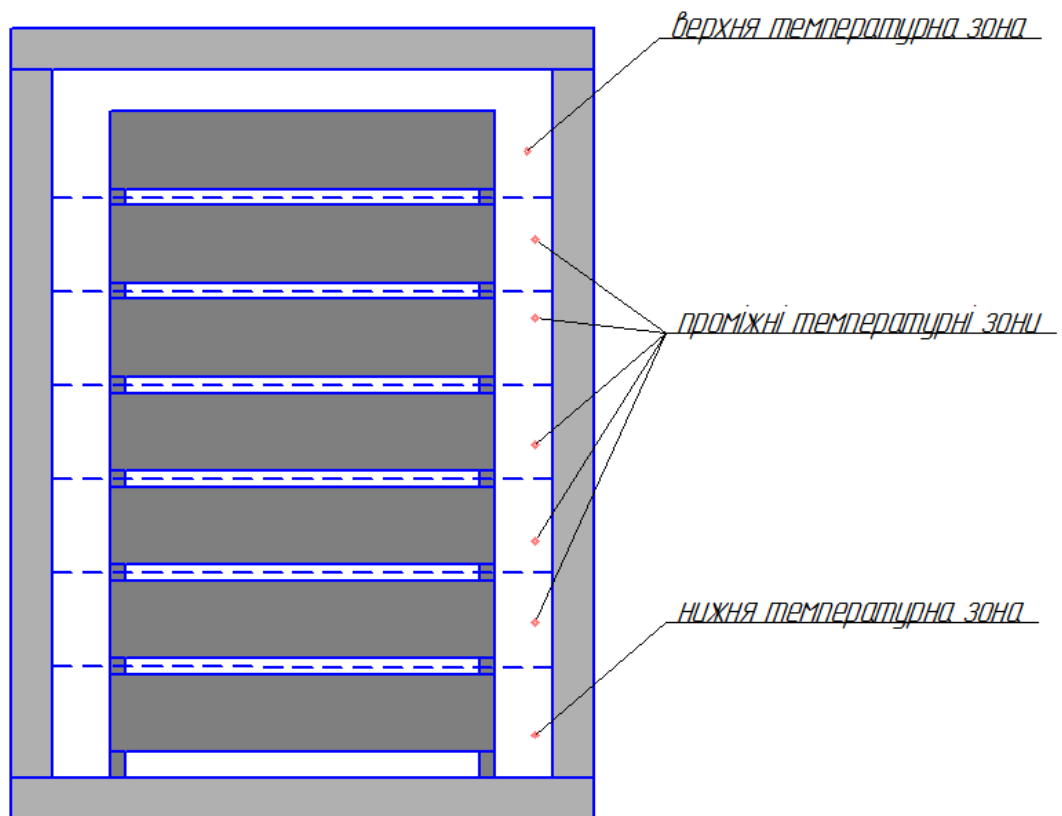


Рис. 4.2. Умовне розділення камери на температурні зони

Нижче відображено:

- основні процеси, які впливають на зміну температури бетонних (залізобетонних) виробів при їх тепловій обробці з використанням теплоти гідратації цементу, для двох варіантів співвідношення між початковими температурами складових досліджуваної системи; ці варіанти вибрано з великої кількості можливих варіантів;
- відповідні теплові баланси камер.

Варіант 4.1. Розглядаються основні процеси, які впливають на зміну температури бетонних або залізобетонних виробів при їх тепловій обробці з використанням теплоти гідратації цементу за умови, що:

- однаковою є початкова температура: сформованих бетонних (залізобетонних) виробів; форм; устаткування, на яке опираються форми; обладнання для розподілу теплоносія в камері в холодний період року; теплоізоляційної конструкції; конструкцій, що огорожують камеру; ґрунту (в певних межах); повітря камери; повітря цеху (температура повітря цеху стала);

– повітряні прошарки наявні: між поверхнями форм з виробами та відповідними внутрішніми поверхнями теплоізоляційної конструкції; між зовнішніми поверхнями теплоізоляційної конструкції та внутрішніми поверхнями конструкцій, що огороджують камеру (рис. В.3 з урахуванням того, що нижню форму теплоізолювано відповідно до рис. В.4);

– обладнання для розподілу теплоносія в камері в холодний період року розташовано в просторі між теплоізоляційною конструкцією та конструкціями, що огороджують теплову камеру;

– впливом процесів масообміну між поверхнею тверднучих виробів і повітрям на процеси теплообміну в камері нехтують (див. підрозділи 4.1, 4.4).

Унаслідок гідратації цементу підвищується температура тверднучих бетонних (залізобетонних) виробів, що зумовлює інтенсифікацію цього процесу. Результатом зростання температури виробів є підвищення температури форм. Виникає різниця температур між поверхнями форм з виробами та: устаткуванням, на якому розміщено форми; повітрям прошарків; внутрішніми поверхнями теплоізоляційної конструкції. Відповідно утворюється: теплообмін шляхом теплопровідності між формами й устаткуванням, на яке форми опираються; конвективний теплообмін; променевий теплообмін між поверхнями форм з бетонними (залізобетонними) виробами та відповідними поверхнями теплоізоляційної конструкції. Наслідком цих процесів є:

– зниження температури бетону, що зумовлює зниження інтенсивності гідратації цементу; слід підкреслити, що одночасно з указаним процесом відбувається підвищення температури виробів унаслідок тепловиділення при гідратації цементу та відповідне підвищення інтенсивності гідратації цементу;

– утворення різниці температур між бетонними (залізобетонними) виробами (оскільки нижній і верхній виробу й відповідні форми знаходяться в особливих умовах теплообміну з навколишнім середовищем);

– поступове нагрівання повітря прошарків й теплоізоляційної конструкції; після прогрівання теплоізоляційної конструкції буде відбуватися

теплообмін між зовнішніми поверхнями теплоізоляційної конструкції та: повітрям прошарків; внутрішніми поверхнями конструкцій, що огорожують камеру; обладнанням для розподілу теплоносія в холодний період року і т. ін.

Розглядаються теплові баланси окремо розташованої виробничої камери для теплової обробки бетонних або залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу (для умов варіанта 4.1). Теплова камера не поділяється на температурні зони. Значення величин λ , c , ρ приймаються як середньозважені значення складових досліджуваної системи (п'яте спрощення (див. підрозділ 4.1)).

Термін тверднення в тепловій камері бетонних або залізобетонних виробів поділяється на певні проміжки часу. Визначення тривалості цих проміжків відображено в пункті 3.2.4.

Варіант 4.1,а. Розглядаються теплові баланси виробничої камери з урахуванням того, що теплоізоляційна конструкція впродовж досліджуваного терміну тверднення в камері бетонних чи залізобетонних виробів не прогрівається по товщині повністю.

Тепловий баланс заглибленої (або надземної) виробничої камери для i -го проміжку часу має вигляд

$$Q_E = Q_B + Q_{AP} + Q_F + Q_U + Q_T, \quad (4.2)$$

де Q_E – кількість теплоти, що виділяється при гідратації цементу впродовж i -го проміжку часу, Дж;

Q_B , Q_{AP} , Q_F , Q_U – витрати теплоти впродовж i -го проміжку часу на нагрівання: бетону; арматури (для залізобетонних виробів); форм та устаткування, на яке опираються форми, Дж;

Q_T – витрати теплоти впродовж i -го проміжку часу на нагрівання теплоізоляційної конструкції, Дж; ці витрати теплоти дорівнюють

$$Q_T = Q_{TC} + Q_{ТПР} + Q_{ТН}, \quad (4.3)$$

де Q_{TC} , $Q_{ТПР}$, $Q_{ТН}$ – витрати теплоти на нагрівання впродовж і-го проміжку часу стінок і перекриття теплоізоляційної конструкції та нижнього теплоізоляційного шару цієї конструкції, Дж; методику обчислення величин Q_{TC} , $Q_{ТПР}$, $Q_{ТН}$ наведено в пункті 3.2.4.

Зміна тепловмісту досліджуваної системи (до складу котрої входять бетонні або залізобетонні вироби, форми й устаткування, на яке опираються форми) впродовж і-го проміжку часу дорівнює

$$Q_B + Q_{AP} + Q_{\Phi} + Q_Y = c_C m_C (t_{CK} - t_{СП}), \quad (4.4)$$

де c_C – середня питома масова теплоємність матеріалів досліджуваної системи, Дж/(кг·°C);

m_C – маса складових досліджуваної системи, кг;

$t_{СП}$, t_{CK} – середні температури складових досліджуваної системи, відповідно на початку та наприкінці і-го проміжку часу, °C;

витрати теплоти Q_{AP} враховуються для залізобетонних виробів.

Тоді рівняння (4.2) має вигляд

$$Q_E = c_C m_C (t_{CK} - t_{СП}) + Q_{TC} + Q_{ТПР} + Q_{ТН}, \quad (4.5)$$

Витрати теплоти на нагрівання впродовж і-го проміжку часу складових теплоізоляційної конструкції Q_{TC} , $Q_{ТПР}$, $Q_{ТН}$ дорівнюють відповідній частині втрат теплоти формами з виробами внаслідок наявності конвективного теплообміну (Q_K) і променевого теплообміну (Q_P):

$$Q_K + Q_P = Q_{TC} + Q_{ТПР} + Q_{ТН}, \quad (4.6)$$

де Q_K – кількість теплоти, яку віддає досліджувана система в навколишнє середовище впродовж і-го проміжку часу внаслідок наявності конвективного теплообміну, Дж;

Q_p – кількість теплоти, Дж, що передається впродовж і-го проміжку часу внаслідок наявності променевого теплообміну від поверхонь досліджуваної системи до відповідних внутрішніх поверхонь теплоізоляційної конструкції.

Тепловий баланс досліджуваної системи (до складу котрої входять бетонні або залізобетонні вироби, форми та устаткування, на яке опираються форми) має вигляд

$$Q_E = c_c m_c (t_{CK} - t_{СП}) + Q_K + Q_P. \quad (4.7)$$

Кількість теплоти, Дж, яку втрачає впродовж і-го проміжку часу досліджувана система внаслідок наявності конвективного теплообміну, можна обчислити за формулою (за умови, що вироби мають форму пластини)

$$Q_K = 2\delta F_c \rho_c c_c (\overline{t_{CK}} - t_{СП}) n, \quad (4.8)$$

де δ – напівтовщина бетонного або залізобетонного виробу, м;

F_c – площа поверхні теплообміну, м²;

c_c – середня питома масова теплоємність тверднучого бетону, арматури (для залізобетонного виробу), форми та устаткування, на якому розміщено форму, Дж/(кг·°C);

ρ_c – середня густина тверднучого бетону, арматури (для залізобетонної плити), форми та устаткування, на якому розміщено форму, кг/м³;

$\overline{t_{CK}}$ – середня температура досліджуваної системи наприкінці і-го проміжку часу внаслідок наявності конвективного теплообміну, °C;

$t_{СП}$ – середня температура досліджуваної системи на початку і-го проміжку часу, °C;

n – кількість бетонних плит.

Кількість теплоти, Дж, яку втрачає впродовж і-го проміжку часу досліджувана система внаслідок наявності променевого теплообміну, можна обчислити за формулою (3.78).

Рівняння (4.6) можна навести у вигляді

$$2\delta F_c \rho_c c_c (\overline{t_{ck}} - t_{cп}) n + Q_p = Q_{TC} + Q_{ТПР} + Q_{ТН}. \quad (4.9)$$

Рівняння (4.7) можна відобразити так:

$$Q_E = c_c m_c (t_{ck} - t_{cп}) + 2\delta F_c \rho_c c_c (\overline{t_{ck}} - t_{cп}) n + Q_p. \quad (4.10)$$

Середня температура досліджуваної системи наприкінці і-го проміжку часу внаслідок наявності конвективного теплообміну, °С, дорівнює

$$\overline{t_{ck}} = t_{п} + \overline{\Theta_{ck}} (t_{cп} - t_{п}), \quad (4.11)$$

де $\overline{\Theta_{ck}}$ – середня безрозмірна температура досліджуваної системи наприкінці і-го проміжку часу внаслідок наявності конвективного теплообміну;

$t_{п}$ – середня за і-й проміжок часу температура повітря прошарків, °С.

Середня безрозмірна температура досліджуваної системи наприкінці і-го проміжку часу внаслідок наявності конвективного теплообміну обчислюється за рівнянням

$$\overline{\Theta_{ck}} = \frac{\overline{t_{ck}} - t_{п}}{t_{cп} - t_{п}} = \sum_{n=1}^{n \rightarrow \infty} \frac{2 \sin^2 \mu_n}{\mu_n^2 + \mu_n \sin \mu_n \cos \mu_n} \exp(-\mu_n^2 Fo); \quad (4.12)$$

якщо $Fo \geq 0,3$, то

$$\overline{\Theta_{ck}} = \frac{\overline{t_{ck}} - t_{п}}{t_{cп} - t_{п}} = \frac{2 \sin^2 \mu_1}{\mu_1^2 + \mu_1 \sin \mu_1 \cos \mu_1} \exp(-\mu_1^2 Fo). \quad (4.13)$$

Кількість теплоти, Дж, яку втрачає досліджувана система (до складу якої входять бетонні або залізобетонні вироби, форми та устаткування, на яке опираються форми) впродовж і-го проміжку часу внаслідок наявності конвективного теплообміну, можна обчислити за формулою

$$Q_K = c_C m_C (t_{CK} - t_{П}) \beta_B, \quad (4.14)$$

тоді рівняння (4.6) можна навести у вигляді

$$c_C m_C (t_{CK} - t_{П}) \beta_B + Q_P = Q_{TC} + Q_{ТПР} + Q_{ТН}; \quad (4.15)$$

рівняння (4.7) можна відобразити так:

$$Q_E = c_C m_C (t_{CK} - t_{СП}) + c_C m_C (t_{CK} - t_{П}) \beta_B + Q_P, \quad (4.16)$$

де $t_{СП}$, t_{CK} – середня температури складових системи, що досліджується, відповідно на початку та наприкінці i -го проміжку часу, °С;

$t_{П}$ – середня за i -й проміжок часу температура повітря прошарків, °С ;

β_B – коефіцієнт, котрий враховує, яку частку теплоти втрачає досліджувана система впродовж i -го проміжку часу внаслідок наявності конвективного теплообміну (відносно кількості теплоти, котру втрачає система при охолодженні до температури повітря); коефіцієнт β_B визначається за довідковими даними (див. пункт 3.2.1) за допомогою критерію Фур'є, який дорівнює

$$F_0 = \Delta\tau / c_C m_C R_C; \quad (4.17)$$

$$R_C = m_C / (\rho_C \lambda_C F^2) + 1 / (\alpha_B F_B + \alpha_{ГГ} F_{ГГ} + \alpha_{ГН} F_{ГН}), \quad (4.18)$$

де ρ_C – середня густина матеріалів досліджуваної системи, кг/м³;

λ_C – середній коефіцієнт теплопровідності матеріалів досліджуваної системи, Вт/(м·°С);

α_B – коефіцієнт тепловіддачі вертикальних поверхонь теплообміну, Вт/(м²·°С);

$\alpha_{ГГ}$ – коефіцієнт тепловіддачі горизонтальних поверхонь теплообміну, обернених угору, $Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$;

$\alpha_{ГН}$ – коефіцієнт тепловіддачі горизонтальних поверхонь теплообміну, обернених униз, $Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$;

формули для обчислення коефіцієнтів тепловіддачі при природній конвекції наведено в пункті 3.2.4;

F – загальна площа поверхні теплообміну досліджуваної системи, $м^2$, яка дорівнює

$$F = F_B + F_{ГГ} + F_{ГН}, \quad (4.19)$$

де F_B – площа вертикальних поверхонь теплообміну, $м^2$;

$F_{ГГ}$ – площа горизонтальних поверхонь теплообміну, обернених угору, $м^2$;

$F_{ГН}$ – площа горизонтальних поверхонь теплообміну, обернених униз, $м^2$.

Варіант 4.1,б. Розглядаються теплові баланси окремо розташованої виробничої камери відповідно до умов варіанта 4.1 з урахуванням того, що:

– теплоізоляційна конструкція впродовж досліджуваного терміну тверднення в камері бетонних або залізобетонних виробів повністю прогріта по товщині;

– конструкції, що огорожують камеру, не прогріті по товщині повністю.

Тепловий баланс заглибленої (або надземної) виробничої камери для i -го проміжку часу має вигляд

$$Q_E = Q_B + Q_{AP} + Q_\Phi + Q_Y + Q_T + Q_O + Q_C + Q_{ГР} + Q_{ПД}, \quad (4.20)$$

де Q_O – витрати теплоти впродовж i -го проміжку часу на нагрівання обладнання, яке забезпечує розподілення в камері теплоносія в холодний період року, Дж;

Q_C , $Q_{ГР}$, $Q_{ПД}$ – витрати теплоти впродовж i -го проміжку часу на нагрівання стін, кришки та підлоги (днища) камери, Дж; методику обчислення вказаних величин наведено в пункті 3.2.4;

пояснення до інших складових цього рівняння наведено в поясненнях до формули (4.2).

Варіант 4.2. Розглядаються основні процеси, які впливають на зміну температури бетонних або залізобетонних виробів при їх тепловій обробці з використанням теплоти гідратації цементу.

Відмінність початкових умов прикладу 4.2 від прикладу 4.1: початкова температура сформованих бетонних або залізобетонних виробів та форм нижча, ніж початкова температура теплоізоляційної конструкції.

Однаковою є початкова температура: теплоізоляційної конструкції; конструкцій, що огорожують камеру; устаткування, на яке опираються форми; обладнання для розподілу теплоносія в камері в холодний період року (за умови наявності цього обладнання); ґрунту (в певних межах); повітря камери; повітря цеху (температура повітря цеху стала).

Температура тверднучих бетонних залізобетонних) виробів підвищується внаслідок наявності: гідратації цементу; теплообміну з устаткуванням, на якому розміщено форми; променевого теплообміну між внутрішніми поверхнями теплоізоляційної конструкції та відповідними поверхнями форм з виробами; конвективного теплообміну. Підвищення температури бетону зумовлює інтенсифікацію гідратації цементу. Поступово зменшується різниця температур між внутрішніми поверхнями теплоізоляційної конструкції та поверхнями форм з бетонними (залізобетонними) виробами і т.ін.

Тепловий баланс виробничої камери для і-го проміжку часу, впродовж якого:

– температура бетонних або залізобетонних виробів, форм та устаткування, на яке форми опираються, нижча, ніж температура внутрішніх поверхонь теплоізоляційної конструкції;

– температура зовнішньої поверхні теплоізоляційної конструкції дорівнює температурі навколишнього середовища,

має вигляд

$$Q_E + Q_H = Q_B + Q_{AP} + Q_{\Phi} + Q_U, \quad (4.21)$$

де Q_H – зміна тепловмісту теплоізоляційної конструкції впродовж i -го проміжку часу, Дж;

витрати теплоти Q_{AP} враховуються для залізобетонних виробів;

пояснення до інших складових цього рівняння наведено вище.

Підсумки:

1. Розроблено математичні моделі процесів теплообміну в камерах, призначених для теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу.

2. Теплові баланси камер при досліджуваному способі теплової обробки вказаних виробів складено за умови, що камери не розділено на температурні зони. Якщо досліджувану камеру розділено на температурні зони, то необхідно враховувати процеси теплообміну між виробами (див. пункт 3.2.8).

4.3. Алгоритм обчислення процесів теплообміну в камері для теплової обробки бетонних або залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу

Розглядається алгоритм обчислення процесів теплообміну в камері для теплової обробки бетонних або залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу.

Вихідні дані відповідають варіанту 4.1, а (див. підрозділ 4.2).

Термін, упродовж якого бетонні (залізобетонні) вироби тверднуть у камері, поділяється на певні проміжки часу (див. пункт 3.2.4). Для кожного із цих проміжків часу складається система рівнянь (теплових балансів).

Загальний вигляд системи рівнянь для i -го проміжку часу:

$$\begin{cases} Q_E = Q_B + Q_{AP} + Q_\Phi + Q_Y + Q_K + Q_P; \\ Q_K + Q_P = Q_{TC} + Q_{ТПР} + Q_{ТН}, \end{cases} \quad (4.22)$$

(витрати теплоти Q_{AP} враховуються для залізобетонних виробів).

Перший варіант системи рівнянь

(для плит):

$$\begin{cases} Q_E = c_C m_C (t_{CK} - t_{СП}) + 2\delta F_c \rho_c c_c (\overline{t_{CK}} - t_{СП}) n + Q_P; \\ 2\delta F_c \rho_c c_c (\overline{t_{CK}} - t_{СП}) n + Q_P = Q_{TC} + Q_{ТПР} + Q_{ТН}. \end{cases} \quad (4.23)$$

Нижче наведено визначення складових цих рівнянь.

$$1) Q_E = c_C m_C (t_{CK} - t_{СП}) + 2\delta F_c \rho_c c_c (\overline{t_{CK}} - t_{СП}) n + Q_P;$$

$$\overline{t_{CK}} = t_{П} + \overline{\Theta_{CK}} (t_{СП} - t_{П});$$

$$\overline{\Theta_{CK}} = \frac{\overline{t_{CK}} - t_{П}}{t_{СП} - t_{П}} = \sum_{n=1}^{n \rightarrow \infty} \frac{2 \sin^2 \mu_n}{\mu_n^2 + \mu_n \sin \mu_n \cos \mu_n} \exp(-\mu_n^2 Fo);$$

якщо $Fo \geq 0,3$, то

$$\overline{\Theta_{CK}} = \frac{\overline{t_{CK}} - t_{П}}{t_{СП} - t_{П}} = \frac{2 \sin^2 \mu_1}{\mu_1^2 + \mu_1 \sin \mu_1 \cos \mu_1} \exp(-\mu_1^2 Fo);$$

$$Fo = \frac{a\tau}{\delta^2};$$

$$a = \frac{\lambda}{c\rho};$$

$$\mu_n = f(Bi);$$

$$Bi = \frac{\alpha\delta}{\lambda};$$

коефіцієнт α визначається окремо для вертикальних поверхонь та для горизонтальних поверхонь, обернених угору і вниз;

$$\alpha_K = \alpha_B = \bar{\alpha} = \overline{Nu_{\Pi}} \frac{\lambda_{\Pi}}{h};$$

$$Gr_{\Pi} Pr_{\Pi} = \frac{g \beta_{\Pi} \Delta t h^3}{v_{\Pi}^2} Pr_{\Pi};$$

$$10^3 < Gr_{\Pi} Pr_{\Pi} < 10^9: \overline{Nu_{\Pi}} = 0,75 (Gr_{\Pi} Pr_{\Pi})^{0,25};$$

$$Gr_{\Pi} Pr_{\Pi} \geq 6 \cdot 10^{10}: \overline{Nu_{\Pi}} = 0,15 (Gr_{\Pi} Pr_{\Pi})^{1/3};$$

$$\alpha_K = \alpha_{\Gamma\Gamma} = \bar{\alpha} = \overline{Nu_p} \frac{\lambda_p}{l};$$

$$l = F / \Pi;$$

$$t_p = 0,5 (t_{\Pi} + t_c);$$

$$Ra_p = Gr_p Pr_p = \frac{g \beta_p \Delta t l^3}{\nu_p^2} Pr_p;$$

$$\text{при } Ra_p < 10^5: \overline{Nu}_p = 1,1 Ra_p^{1/5};$$

$$\text{при } Ra_p > 10^5: \overline{Nu}_p = 0,203 Ra_p^{1/3};$$

$$\alpha_k = \alpha_{\Gamma H} = 1,16 \sqrt[3]{t_c - t_{\Pi}};$$

$$Q_p = \varepsilon_{\Pi} c_0 \left[\left(\frac{T_{c1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{c2}}{100} \right)^4 \right] F_1 \Delta \tau;$$

$$\varepsilon_{\Pi} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}.$$

$$2) 2\delta F_c \rho_c c_c (\overline{t_{CK}} - t_{C\Pi}) n + Q_p = Q_{TC} + Q_{ТПР} + Q_{ТН}.$$

Визначення Q_{TC} :

$$t_{i,\tau+\Delta\tau} = \frac{t_{i+1,\tau} + t_{i-1,\tau}}{2} \text{ за умови } \frac{2a \Delta\tau}{\Delta x^2} = 1; a = \frac{\lambda}{c\rho};$$

$$Q_{TC} = \sum_{i=1}^{i=n} c m (t_{КШ_i} - t_{ПШ_i});$$

$$t_{КШ_i} = 0,5 (t_{i,\tau+\Delta\tau} + t_{i+1,\tau+\Delta\tau});$$

$$t_{ПШ_i} = 0,5 (t_{i,\tau} + t_{i+1,\tau}).$$

Аналогічно визначаються витрати теплоти $Q_{ТПР}$, $Q_{ТН}$.

Другий варіант системи рівнянь:

$$\begin{cases} Q_E = c_C m_C (t_{CK} - t_{C\Pi}) + c_C m_C (t_{CK} - t_{\Pi}) \beta_B + Q_p; \\ c_C m_C (t_{CK} - t_{\Pi}) \beta_B + Q_p = Q_{TC} + Q_{ТПР} + Q_{ТН}. \end{cases} \quad (4.24)$$

Нижче наведено визначення складових цих рівнянь.

$$1) Q_E = c_C m_C (t_{CK} - t_{C\Pi}) + c_C m_C (t_{CK} - t_{\Pi}) \beta_B + Q_p.$$

$$\beta_B = f(F_0);$$

$$F_0 = \Delta\tau / c_C m_C R_C;$$

$$R_C = m_C / (\rho_C \lambda_C F^2) + 1 / (\alpha_B F_B + \alpha_{ГГ} F_{ГГ} + \alpha_{ГН} F_{ГН});$$

$$F = F_B + F_{ГГ} + F_{ГН};$$

формули для визначення Q_P та коефіцієнтів α_B , $\alpha_{ГГ}$, $\alpha_{ГН}$ наведено в поясненнях до попередньої системи рівнянь.

$$2) c_C m_C (t_{СК} - t_{П}) \beta_B + Q_P = Q_{ТС} + Q_{ТПР} + Q_{ТН};$$

формули для визначення складових цього теплового балансу наведено:

- в поясненнях до попереднього теплового балансу;
- в поясненнях до попередньої системи рівнянь.

Алгоритм обчислення температурного режиму тверднення бетонних або залізобетонних виробів у тепловій камері для першого варіанта системи рівнянь, коли бетонні вироби мають форму пластини, наведено нижче.

1. Температурне поле в камері – нестационарне, тому тривалість теплової обробки бетонних виробів розділяється на проміжки часу $\Delta\tau$.

Максимальний проміжок часу $\Delta\tau_{\text{макс}}$ обчислюється згідно з рекомендаціями, наведеними в пункті 3.2.4. Приймається: $\Delta\tau \leq \Delta\tau_{\text{макс}}$.

2. Для першого проміжку часу визначається кількість теплоти Q_E , що виділяється при гідратації цементу.

Кількість теплоти Q_E , що виділяється при гідратації цементу, залежить від температури тверднучих бетонних виробів (за інших рівних обставин). Температура бетонних виробів у свою чергу залежить від співвідношення між складовими відповідних теплових балансів камери, зокрема, від кількості теплоти Q_E .

Значення Q_E визначається при початковій для кожного періоду часу температурі бетонних виробів (згідно з попередньо отриманими експериментальними даними).

3. Приймається орієнтовне значення середньої температури досліджуваної системи наприкінці першого проміжку часу $t_{СК}$.

Орієнтовне значення середньої за перший проміжок часу температури досліджуваної системи t_C дорівнює

$$t_C = t_{СП} + t_{СК}, \quad (4.25)$$

де $t_{СП}$ – температура складових системи, що досліджується, на початку першого проміжку часу, °С.

4. Приймається орієнтовне значення середньої температури внутрішніх поверхонь теплоізоляційної конструкції наприкінці першого проміжку часу.

Температури внутрішніх поверхонь вертикальних і горизонтальних (обернених угору та вниз) конструкцій теплової камери можуть відрізнятися. Застосовується спрощення: у розрахунках використовується середня температура цих поверхонь.

Обчислюється орієнтовне значення середньої за перший проміжок часу температури внутрішніх поверхонь вертикальних і горизонтальних конструкцій теплової камери.

За необхідності врахування в обчисленнях відмінності в температурах внутрішніх поверхонь теплоізоляційної конструкції камера розділяється на температурні зони (рис. 4.1, 4.2). Відповідно кількість теплових балансів у системі рівнянь збільшується.

5. Обчислюється орієнтовна середня за перший проміжок часу температура повітря прошарків $t_{П}$.

Орієнтовна середня за перший проміжок часу температура повітря прошарків $t_{П}$ розраховується як середньоарифметичне значення між орієнтовною середньою за перший проміжок часу температурою внутрішніх поверхонь теплоізоляційної конструкції та орієнтовною середньою за перший проміжок часу температурою досліджуваної системи t_C .

6. Обчислюється за формулами (4.8), (3.78) кількість теплоти, Дж, яку втрачає досліджувана система (до складу котрої входять бетонні вироби, що мають форму пластини, форми та устаткування, на яке опираються форми)

впродовж першого проміжку часу внаслідок наявності конвективного теплообміну та променевого теплообміну:

$$Q_K = 2\delta F_c \rho_c c_c (\overline{t_{CK}} - t_{СП}) n;$$

$$Q_P = \varepsilon_{\Pi} c_0 \left[\left(\frac{T_{c1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{c2}}{100} \right)^4 \right] F_1 \Delta \tau.$$

7. Обчислюються за залежністю (4.3) витрати теплоти Q_T на нагрівання теплоізоляційної конструкції впродовж першого проміжку часу:

$$Q_T = Q_{TC} + Q_{ТПР} + Q_{ТН}.$$

8. Складається для початкового проміжку часу система рівнянь (4.23)

$$\begin{cases} Q_E = c_C m_C (t_{CK} - t_{СП}) + 2\delta F_c \rho_c c_c (\overline{t_{CK}} - t_{СП}) n + Q_P; \\ 2\delta F_c \rho_c c_c (\overline{t_{CK}} - t_{СП}) n + Q_P = Q_{TC} + Q_{ТПР} + Q_{ТН}. \end{cases}$$

Уточнюються методом ітерацій температури, які приймали орієнтовно:

- середня температура внутрішніх поверхонь теплоізоляційної конструкції наприкінці першого проміжку часу;
- середня температура досліджуваної системи наприкінці першого проміжку часу t_{CK} .

9. Аналогічно розглядаються інші проміжки часу.

Якщо впродовж терміну теплової обробки бетонних виробів теплоізоляційна конструкція прогріється по товщині повністю, то в теплових балансах ураховується наявність теплообміну між зовнішніми (щодо бетонних виробів) поверхнями теплоізоляційної конструкції, та відповідним середовищем.

Нижче наведено алгоритм обчислення температурного режиму тверднення бетонних або залізобетонних виробів у тепловій камері для другого варіанта системи рівнянь.

Пункти 1...5 аналогічні до відповідних пунктів у наведеному вище алгоритму.

6. Обчислюється за формулами (4.14), (3.78) кількість теплоти, Дж, яку втрачає досліджувана система (до складу котрої входять бетонні вироби, форми й устаткування, на яке опираються форми) впродовж першого проміжку часу внаслідок наявності конвективного теплообміну та променевого теплообміну:

$$Q_K = c_C m_C (t_{CK} - t_{П}) \beta_B;$$

$$Q_p = \varepsilon_{п} c_0 \left[\left(\frac{T_{c1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{c2}}{100} \right)^4 \right] F_1 \Delta \tau.$$

Пункт 7 аналогічний до відповідного пункту наведеного вище алгоритму.

8. Складається для початкового проміжку часу система рівнянь (4.24)

$$\begin{cases} Q_E = c_C m_C (t_{CK} - t_{СП}) + c_C m_C (t_{CK} - t_{П}) \beta_B + Q_p; \\ c_C m_C (t_{CK} - t_{П}) \beta_B + Q_p = Q_{TC} + Q_{ТПР} + Q_{ТН}. \end{cases}$$

Уточнюються методом ітерацій температури, які приймали орієнтовно:

- середня температура внутрішніх поверхонь теплоізоляційної конструкції наприкінці першого проміжку часу;
- середня температура досліджуваної системи наприкінці першого проміжку часу t_{CK} .

9. Аналогічно розглядаються інші проміжки часу.

Підсумки. Підсумки. Розроблено алгоритм обчислення температурного режиму тверднення бетонних та залізобетонних виробів при їх тепловій обробці з використанням теплоти гідратації цементу для вибраних вихідних умов. Для інших вихідних умов здійснюються корегування відповідних формул.

4.4. Аналіз інтенсивності тепло- й масообміну між поверхнями тверднучих бетонних та залізобетонних виробів і повітрям камери в початковий проміжок часу

При тепловій обробці бетонних та залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу в них відбуваються процеси внутрішнього й зовнішнього тепло- і масообміну.

Процеси зовнішнього масообміну між поверхнями тверднучих виробів та повітрям камери в досліджуваних умовах впливають на:

- параметри повітря;
- температуру та вологість виробів (у більшості випадків цей вплив незначний, і тому ним доцільно знехтувати).

Наявність гідратації цементу зменшує інтенсивність процесів масообміну в камері.

Надалі розглядаються процеси тепло- і масообміну між поверхнею виробів і повітрям камери в початковий проміжок часу за умови, що парціальний тиск водяної пари $P_{ПВ}$ біля поверхонь бетонних виробів вищий, ніж парціальний тиск водяної пари в повітрі камери $P_{П}$.

Поверхня бетонних виробів у початковий проміжок часу волога, тому наближено приймається, що випаровування вологи з поверхонь виробів у цей період відбувається аналогічно до випаровування вологи з поверхні води.

Тепловий потік від поверхні бетонного виробу до повітря камери (або у зворотному напрямку), обумовлений конвективним теплообміном, дорівнює

$$Q = \alpha \Delta t F, \quad (4.26)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, Вт/(м²·°С);

F – площа «відкритої» поверхні бетонного виробу, м².

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, Вт/(м²·°С), дорівнює

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{l}, \quad (4.27)$$

де l – визначальний розмір, м;

λ – коефіцієнт теплопровідності повітря, Вт/(м·°С), при середній температурі повітря t .

Середня температура повітря біля поверхні бетонного виробу, °С, дорівнює

$$t = 0,5 (t_{\Pi} + t_{\Pi\text{Б}}), \quad (4.28)$$

де $t_{\Pi\text{Б}}$ – температура поверхні бетонного виробу, °С.

t_{Π} – температура повітря камери, °С.

Мар'ямовим Н.Б. у книзі [152] наведено формулу для обчислення критерію Нуссельта для умов природної конвекції за наявності масообміну (з посиланням на роботу Нестеренка О.В.)

$$\text{Nu} = 4 (\text{Ar Pr})^{0,108}, \quad (4.29)$$

при $\text{Ar Pr} = 3 \cdot 10^6 \dots 2 \cdot 10^8$.

У більш пізній праці [173] Нестеренко О.В. наводить таку формулу для обчислення критерію Нуссельта для умов природної конвекції з урахуванням наявності масообміну

$$\text{Nu} = 5(\text{Ar Pr})^{0,104}, \quad (4.30)$$

при $\text{ArPr} = 3 \cdot 10^6 \dots 2 \cdot 10^8$.

Критерій Архімеда дорівнює

$$\text{Ar} = \frac{l^3 g}{\nu^2} \cdot \frac{\rho_{\Pi} - \rho_{\Pi\text{Б}}}{\rho_{\Pi}}, \quad (4.31)$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с²;

ρ_{Π} – густина повітря камери, кг/м³;

$\rho_{\Pi\text{Б}}$ – густина повітря біля поверхні бетонного виробу, кг/м³;

Густина повітря камери, кг/м³, обчислюється за залежністю, наведеною в книзі [173],

$$\rho_{\Pi} = 1,293 \frac{273}{T_{\Pi}} \left(\frac{P_{\text{Б}}}{101325} - 0,378 \frac{P_{\Pi}}{101325} \right), \quad (4.32)$$

де $P_{\text{Б}}$ – барометричний тиск, Па;

P_{Π} – парціальний тиск водяної пари, що міститься в повітрі камери, Па.

Густина повітря біля поверхні бетонного виробу, кг/м^3 , обчислюється за залежністю

$$\rho_{\text{ПБ}} = 1,293 \frac{273}{T_{\text{ПБ}}} \left(\frac{P_{\text{Б}}}{101325} - 0,378 \frac{P_{\text{ПБ}}}{101325} \right), \quad (4.33)$$

де $P_{\text{ПБ}}$ – парціальний тиск водяної пари біля поверхні бетонного виробу, Па.

Кількість вологи W , що випаровується з поверхні бетонного виробу за одиницю часу, кг/с , визначається за формулами, наведеними, зокрема, в книзі [173]:

$$W = \beta' (P_{\text{ПБ}} - P_{\text{П}}) (101325 / P_{\text{Б}}) F; \quad (4.34)$$

$$W = \beta (C_{\text{ПБ}} - C_{\text{П}}) (101325 / P_{\text{Б}}) F. \quad (4.35)$$

Відповідно кількість вологи $W_{\Delta\tau}$, кг , що випаровується з поверхні бетонного виробу за вибраний проміжок часу $\Delta\tau$, обчислюється за формулами:

$$W_{\Delta\tau} = \beta' (P_{\text{ПБ}} - P_{\text{П}}) (101325 / P_{\text{Б}}) F \Delta\tau; \quad (4.36)$$

$$W_{\Delta\tau} = \beta (C_{\text{ПБ}} - C_{\text{П}}) (101325 / P_{\text{Б}}) F \Delta\tau, \quad (4.37)$$

де β' – коефіцієнт масообміну (масовіддачі), віднесений до різниці парціальних тисків, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$;

β – коефіцієнт масообміну (масовіддачі), віднесений до різниці концентрацій водяної пари, м/с ;

$C_{\text{ПБ}}$ – концентрація водяної пари біля поверхні бетонного виробу, кг/м^3 ;

$C_{\text{П}}$ – концентрація водяної пари в повітрі камери, кг/м^3 ;

F – площа відкритої поверхні бетонного виробу, м^2 ;

пояснення до інших величин відображено вище.

Коефіцієнт масовіддачі β , м/с, дорівнює

$$\beta = \text{Nu}' \frac{D}{l}, \quad (4.38)$$

де D – коефіцієнт дифузії, м²/с.

Коефіцієнт масовіддачі β' , кг/(м²·с·Па), дорівнює

$$\beta' = \text{Nu}' \frac{D'}{l}, \quad (4.39)$$

де Nu' – дифузійний критерій Нуссельта;

D' – коефіцієнт дифузії, віднесений до градієнта парціального тиску, кг/(м·с·Па).

Мар'ямовим Н.Б. у книзі [152] наведено формулу для обчислення дифузійного критерію Нуссельта для умов природної конвекції з посиланням на роботу О.В. Нестеренка

$$\text{Nu}' = 0,665 (\text{Ar} \text{Pr}')^{0,248} \quad (4.40)$$

(при $\text{Ar} \cdot \text{Pr}' = 10^4 \dots 3 \cdot 10^8$).

У більш пізній праці [173] Нестеренком О.В. наведено таку формулу для обчислення дифузійного критерію Нуссельта

$$\text{Nu}' = 0,66 (\text{Ar} \text{Pr}')^{0,26} \quad (4.41)$$

(при $\text{Ar} \cdot \text{Pr}' = 3 \cdot 10^6 \dots 2 \cdot 10^8$).

Дифузійний критерій Прандтля дорівнює

$$\text{Pr}' = \frac{\nu}{D}, \quad (4.42)$$

де Pr' – дифузійний критерій Прандтля;

ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості повітря, м²/с, при середній температурі повітря t .

Для водяної пари коефіцієнт дифузії, м²/с, обчислюється за формулою, наведеною в книзі [173],

$$D = 0,0754 \left(\frac{T}{273} \right)^{1,89} \frac{101325}{P_B} \frac{1}{3600}, \quad (4.43)$$

де T – абсолютна середня температура повітря, К.

Концентрація водяної пари в повітрі камери обчислюється за залежністю

$$c_{\text{П}} = \frac{P_{\text{П}}/133,322}{3,463 (273 + t_{\text{П}})} \quad (4.44)$$

Концентрація водяної пари біля поверхні бетонного виробу обчислюється за залежністю

$$c_{\text{ПБ}} = \frac{P_{\text{БП}}/133,322}{3,463 (273 + t_{\text{ПБ}})} \quad (4.45)$$

Кількість прихованої теплоти, що надходить до повітря камери з випаруваною вологою за одиницю часу, дорівнює

$$Q = r W, \quad (4.46)$$

де r – прихована теплота пароутворення, Дж/кг.

Слід підкреслити, що між поверхнею бетонного виробу та навколишніми поверхнями відбувається променевий теплообмін.

Приклад 4.1. Розглядається процес масообміну між поверхнею бетонної тротуарної плити та повітрям камери в період завантаження плит у камеру.

У таблиці 4.1 показано результати обчислення кількості вологи $W_{\Delta t}$, що випаровується з поверхні бетонної тротуарної плити впродовж початкових 15 хв при різних значеннях: температури повітря камери ($t_{\text{П}}$); температури поверхні бетонної плити ($t_{\text{ПБ}}$). Площа поверхні плити дорівнює $0,5 \text{ м}^2$.

Таблиця 4.1

Кількість вологи, що випаровується з поверхні бетонної тротуарної плити впродовж 15 хв

$t_{\text{П}}, ^\circ\text{C}$	$\varphi, \%$	$t_{\text{ПБ}}, ^\circ\text{C}$	$W_{\Delta t}, \text{кг}$
20	65	18	0,0041
20	65	20	0,0053
20	55	20	0,0073
20	65	22	0,0101
25	65	25	0,0078
25	55	25	0,0107

Приклад 4.2. Розглядаються процеси тепло- і масообміну між поверхнею бетонної тротуарної плити та середовищем камери в період завантаження плит у камеру.

Прийнято: площа поверхні бетонної тротуарної плити: $F = 0,5 \text{ м}^2$; температура повітря камери та конструкцій, що її огорожують, $t_{\text{п}} = 20^\circ\text{C}$; відносна вологість повітря камери $\varphi = 65\%$; середня за вибраний проміжок часу температура поверхні бетонної плити: а) $t_{\text{пб}} = 20,3^\circ\text{C}$; б) $t_{\text{пб}} = 22^\circ\text{C}$.

Визначено: кількість випаруваної вологи з поверхні бетонної плити $W_{\Delta t}$ та втрати теплоти плитою в навколишнє середовище впродовж початкових 15 хв.

Втрати теплоти плитою в навколишнє середовище впродовж вибраного проміжку часу Q , Дж, обчислюються за рівнянням

$$Q = Q_{\text{в}} + Q_{\text{к}} + Q_{\text{пр}}, \quad (4.47)$$

де $Q_{\text{в}}$ – кількість теплоти, яку втрачає бетонна плита впродовж вибраного проміжку часу внаслідок випаровування вологи з її поверхні, Дж;

$Q_{\text{к}}$ – втрати теплоти бетонною плитою в навколишнє середовище впродовж вибраного проміжку часу внаслідок конвективного теплообміну, Дж;

$Q_{\text{пр}}$ – втрати теплоти бетонною плитою в навколишнє середовище впродовж вибраного проміжку часу внаслідок променевого теплообміну, Дж.

Варіант а ($t_{\text{пб}} = 20,3^\circ\text{C}$): кількість випаруваної вологи з поверхні бетонної плити впродовж початкових 15 хв дорівнює $W_{\Delta t} = 0,0061 \text{ кг}$. Результати порівняння величин $Q_{\text{в}}$, $Q_{\text{к}}$ та $Q_{\text{пр}}$ відображено на рис. 4.3.

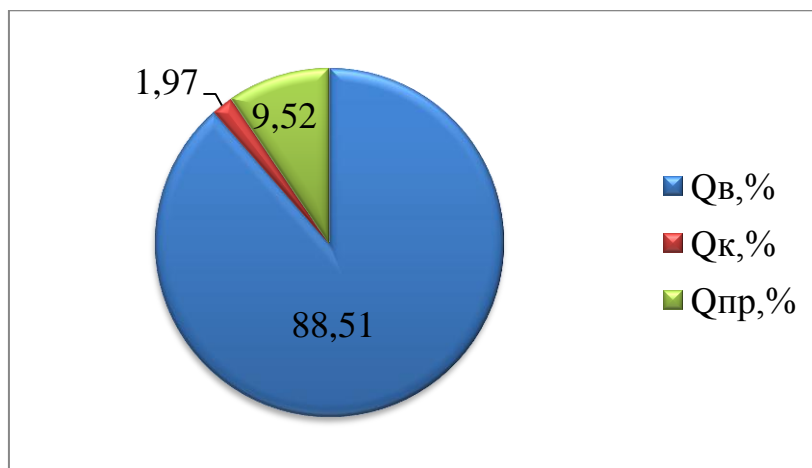


Рис. 4.3. Результати обчислень (приклад 4.2, варіант а)

Втрати теплоти в навколишнє середовище бетонною плитою (і формою) внаслідок конвективного теплообміну обчислено:

- без урахування масообміну (Q_K) за формулами, наведеними в пункті 3.2.5.
- з урахуванням масообміну (Q_K') за формулами, поданими в цьому підрозділі.

Якщо прийняти $Q_K' = 100\%$, то $Q_K = 94,4\%$.

Варіант б ($t_{\text{ПБ}} = 22^\circ\text{C}$): кількість випаруваної вологи з поверхні бетонної плити впродовж початкових 15 хв дорівнює $W_{\Delta t} = 0,0101$ кг (див. приклад 4.1); результати порівняння величин Q_B , Q_K та $Q_{\text{ПР}}$ відображено на рис. 4.4.

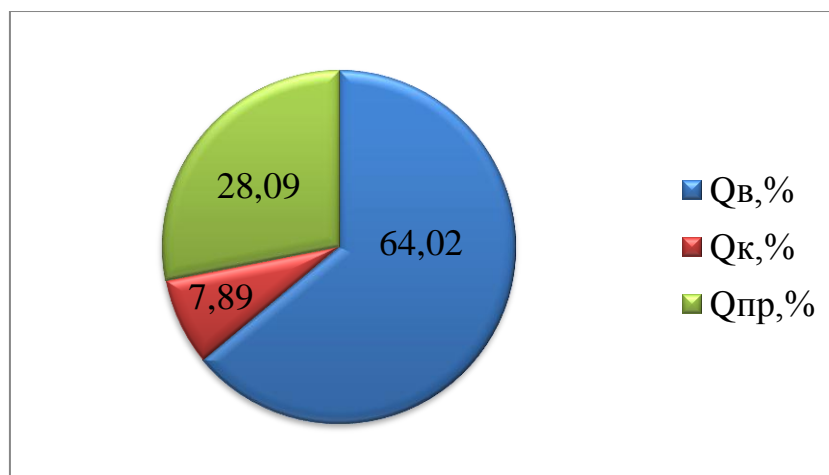


Рис. 4.4. Результати обчислень (приклад 4.2, варіант б)

Якщо прийняти, що втрати теплоти бетонною плитою в навколишнє середовище внаслідок конвективного теплообміну, обчислені з урахуванням масообміну, дорівнюють $Q_K' = 100\%$, то втрати теплоти бетонною плитою в навколишнє середовище внаслідок конвективного теплообміну, обчислені без урахування масообміну, дорівнюють $Q_K = 92,6\%$.

Приклад 4.3. Розглядаються процеси теплообміну між поверхнею бетонної тротуарної плити й середовищем камери в період завантаження плит у камеру.

Прийнято: площа поверхні бетонної тротуарної плити $F = 0,5 \text{ м}^2$; температура повітря камери та конструкцій, котрі її огороджують, $t_{\text{П}} = 20^\circ\text{C}$; відносна вологість повітря камери $\phi = 65\%$; початкова температура бетонної тротуарної плити $t_{\text{Б}} = 20^\circ\text{C}$.

Визначено: співвідношення між витратами теплоти на нагрівання бетонної тротуарної плити, форми й устаткування, на яке опирається форма ($Q_{\text{БТП}} + Q_{\text{Ф}} + Q_{\text{У}}$), та втратами теплоти в навколишнє середовище цією плитою (і формою) внаслідок наявності конвективного теплообміну й променевого теплообміну ($Q_{\text{К}} + Q_{\text{Р}}$). Якщо прийняти суму $Q_{\text{БТП}} + Q_{\text{Ф}} + Q_{\text{У}} + Q_{\text{К}} + Q_{\text{Р}} = 100\%$, то $Q = Q_{\text{БТП}} + Q_{\text{Ф}} + Q_{\text{У}} = 99,97\%$; $Q_{\text{К}} + Q_{\text{Р}} = 0,03\%$ (рис. 4.5).

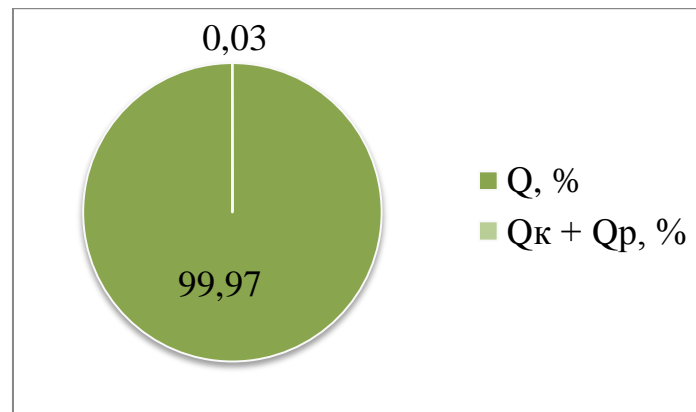


Рис 4.5. Результати обчислень (приклад 4.3)

Підсумки:

1. Розрахунковий аналіз інтенсивності тепло- і масообміну між поверхнею бетонної тротуарної плити та повітрям камери в початковий проміжок часу показав, що:

- витрати теплоти на випаровування вологи з її поверхні перевищують втрати теплоти, обумовлені конвективним і променевим теплообміном;

- основними витратами теплоти в цей період є витрати теплоти на нагрівання цієї плити, форми та устаткування, на яке опирається форма.

2. Обчислення процесів зовнішнього масообміну за формулами, наведеними в цьому підрозділі, доцільно здійснювати тільки для початкового проміжку часу.

3. Експериментальне визначення кількості вологи, що випаровується з поверхонь бетонних тротуарних плиток упродовж доби їх тверднення в лабораторній камері, показало, що відношення маси крапель випарованої вологи W до суми мас плиток і форм m становить: $W / m \rightarrow 0$.

4. Якщо інтенсивність масообміну між поверхнею виробів і повітрям камери незначна, то її впливом на відповідні процеси теплообміну запропоновано нехтувати.

За наявності інтенсивного масообміну між поверхнею виробів і повітрям камери (в початковий період їх тверднення):

- або вироби гідроізольують (патент на корисну модель [196]);
- або проводять експериментальні дослідження впливу процесів масообміну на відповідні процеси теплообміну.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

1. Розроблено математичні моделі процесів теплообміну в камерах, призначених для теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу.

Указані математичні моделі надають можливість:

- розвинути методику експериментально-розрахункових досліджень теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу;
- прогнозувати інтенсивність зміни температури тверднучих бетонних виробів у досліджуваних умовах (з використанням експериментальних визначених показників тепловиділення цементу при гідратації);
- аналізувати напрями зменшення витрат теплоти в камері та втрат теплоти камерою.

2. Показано необхідність аналізу впливу масообміну між поверхнею тверднучих бетонних (залізобетонних) виробів і повітрям камери на інтенсивність відповідних процесів теплообміну.

РОЗДІЛ 5

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

5.1. Матеріали, що досліджуються, та методи випробування

Для проведення експериментів було використано цемент ПЦ І-500-Н та ПЦ І-400-Н (ДСТУ Б В.2.7-46:2010). Виробник АО «Євроцемент-Україна» (місто Балаклія Харківської області).

Міцність при стиску цементу ПЦ І-500-Н становила: через 2 доби 15,3 МПа; через 28 діб 50,8 МПа (визначено згідно з ДСТУ Б В.2.7-187:2009 [57] в терміни, обумовлені в ДСТУ Б В.2.7-46:2010 [51]). Строки тужавлення: початок – 2 год 30 хв, кінець – 4 год 50 хв; нормальна густина цементного тіста 25,9% (визначено згідно з ДСТУ Б В.2.7-185:2009 [56] з урахуванням положень ДСТУ Б В. 2.7-112:2002 [55]).

Міцність при стиску цементу ПЦ І-400-Н дорівнювала: через 7 діб 21,8 МПа; через 28 діб 41,7 МПа (визначено згідно з ДСТУ Б В. 2.7-187:2009 [57] в терміни, вказані в ДСТУ Б В.2.7-46:2010 [51]). Строки тужавлення: початок – 2 год 40 хв, кінець – 6 год 10 хв; нормальна густина цементного тіста 26,2 % (визначено за ДСТУ Б В. 2.7-185:2009 [56]).

Властивості піску визначено згідно з ДСТУ Б В.2.7-232:2010 [61]. Насипна густина сухого піску 1400 кг/м³; модуль крупності піску 1,2. Вміст пиловидних і глинистих часток і вміст органічних домішок відповідає вимогам норм.

Властивості гранітного щебеню фракцій понад 5 до 10 мм виробництва ПАТ «Кіровоградграніт» визначено згідно з ДСТУ Б В.2.7-71:98 [53] та ДСТУ Б В.2.7-75:98 [54]. Насипна густина щебеню 1410 кг/м³.

Вода для проведення випробувань відповідала вимогам ДСТУ ISO 3696:2003 [63].

Хімічні добавки:

- суперпластифікатор на основі полікарбоксилату;
- суперпластифікатор на основі лігносульфонатів;

– прискорювач тверднення цементу на основі тіосульфата і роданіда натрію.

Підбір складу бетону здійснювався згідно з положеннями ДСТУ Б В.2.7-215:2009 [59] та ДСТУ - Н Б В.2.7-299:2013 [62].

5.2. Лабораторні установки для теплової обробки бетонних зразків і виробів

Дослідження теплової обробки гідроізольованих бетонних зразків та бетонних тротуарних плиток здійснювалося з використанням кількох лабораторних установок. Кожна з цих установок має певні конструктивні особливості, але принцип їх дії однаковий.

У сонячні дні весняного, літнього та осіннього періодів року повітря нагрівалося в плоскому колекторі сонячної енергії власної конструкції.

У холодний період року та в хмарні дні весняного, літнього і осіннього періодів року для нагрівання повітря в колекторі енергії було використано інфрачервоний обігрівач (у виробничих установках нагрівання повітря здійснюється за допомогою електричного повітрянагрівача).

Тривалість теплової обробки гідроізольованих бетонних зразків та бетонних тротуарних плиток нагрітим повітрям дорівнювала кільком годинам. Після завершення подачі до лабораторної камери нагрітого повітря тверднення зразків та тротуарних плиток певний час продовжувалося в камері в умовах термосу. Отвори, через які здійснювалася циркуляція повітря, в цей період було закрито утеплювальними клапанами.

У лабораторних установках було розміщено термодатчики, за допомогою яких визначалася температура складових досліджуваної системи.

На рис. 5.1 відображено схему першої лабораторної установки власної конструкції. Лабораторну камеру сконструйовано із пінополістирольних плит. Бокові сторони та днище колектора сонячної енергії теплоізольовано. Також теплоізольовано повітропроводи.

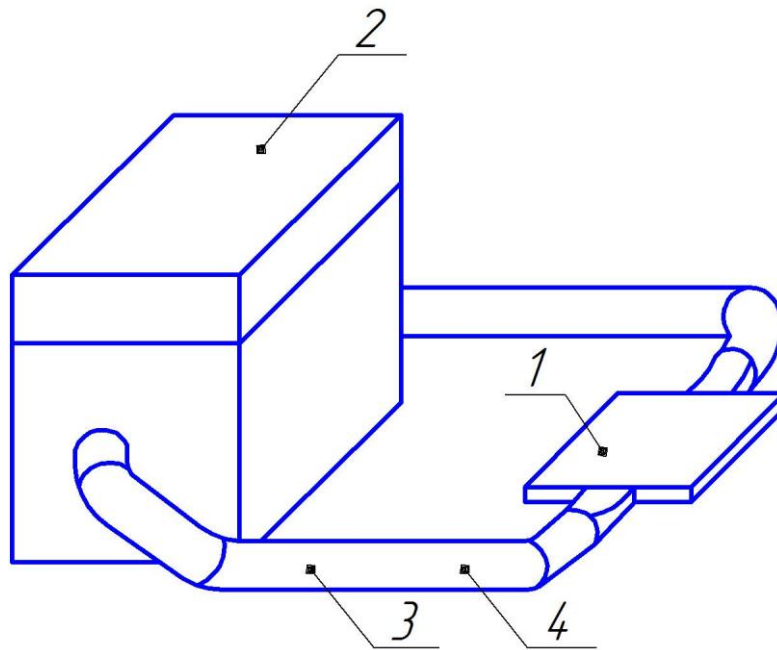


Рис. 5.1. Схема лабораторної установки № 1:

1 – колектор сонячної енергії власної конструкції;

2 – лабораторна камера;

3 – повітропровід;

4 – місце розташування осьового вентилятора

Основні недоліки першої установки, які було враховано при створенні наступних установок:

- невелика площа теплосприймаючої поверхні колектора сонячної енергії;
- повітропроводи не від'єднуються від камери, що ускладнює процес переміщення установки;
- вентилятор розташовано в повітропроводі.

При проведенні дослідів із використанням першої установки в бетонних зразках розміщувалися капсули з термодатчиками. У цьому випадку:

- складно зберегти гідроізоляцію виробів у місці розташування капсул;
- наявність металевих капсул у бетонних зразках впливає на показники міцності бетону при стиску (при руйнівному методі їх визначення).

У подальших дослідах термодатчики розміщувалися на поверхні зразків (у невеликому заглибленні).

На рис. 5.2 відображено схему другої лабораторної установки власної конструкції. Конструктивні відмінності другої установки від першої:

- збільшено площу теплосприймаючої поверхні колектора сонячної енергії;
- повітропроводи приєднано до камери та колектора «хомутами», що надає змогу за необхідності від'єднувати їх від цього устаткування;
- повітропроводи не теплоізолювано;
- вентилятор розташований не в повітропроводі, а в отворі колектора сонячної енергії;
- бокові сторони та днище колектора сонячної енергії не мають шару теплоізоляції.

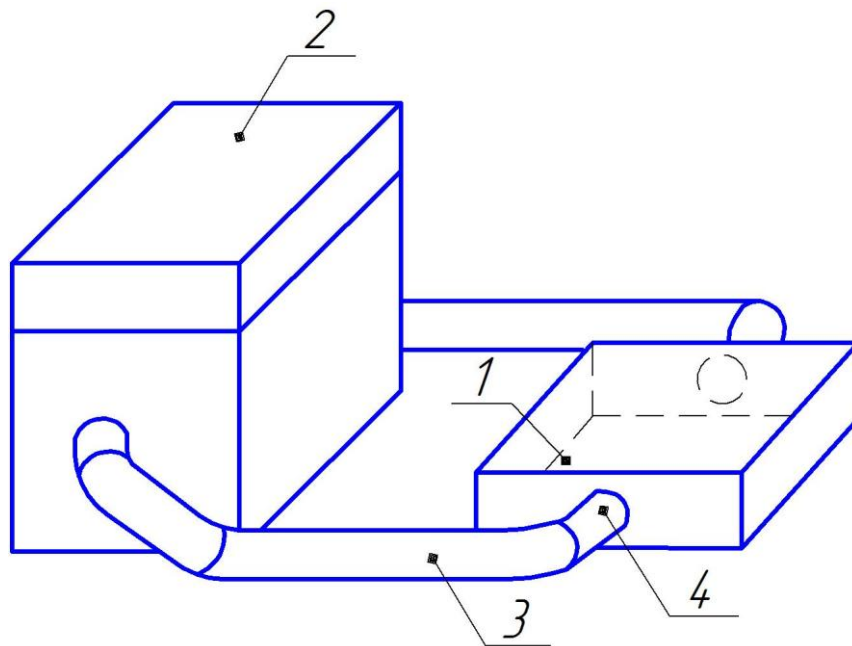


Рис. 5.2. Схема лабораторної установки № 2:

- 1 – колектор сонячної енергії власної конструкції;
- 2 – лабораторна камера;
- 3 – повітропровід;
- 4 – місце розташування осьового вентилятора

На рис. 5.3 відображено лабораторну установку № 2 власної конструкції.

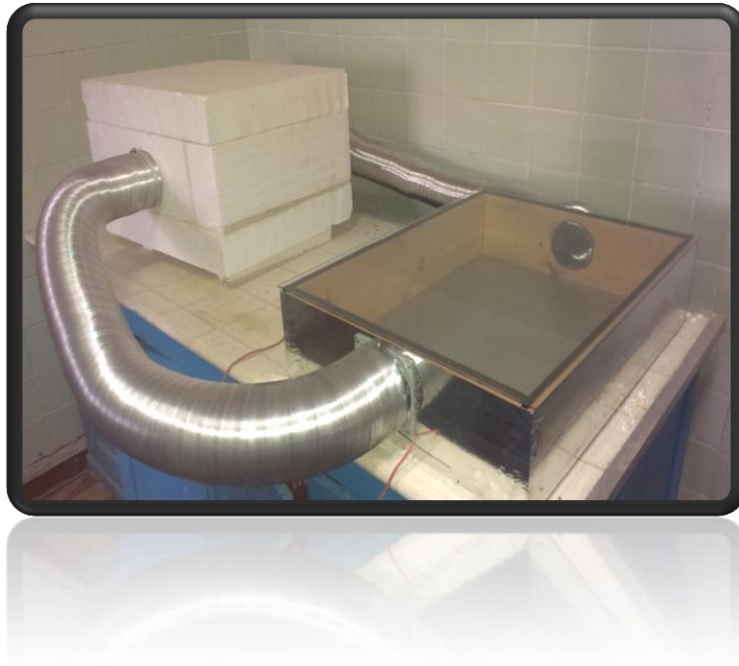


Рис. 5.3 Лабораторна установка № 2

Гофровані повітропроводи в лабораторних установках застосовано з метою можливості зміни відстані від лабораторної камери до колектора. Ці відстані в холодний та теплий періоди року можуть бути різними. На частину поверхонь повітропроводів потрапляє сонячна енергія.

На рис. 5.4 показано інфрачервоний обігрівач, який використано в експериментальних дослідженнях.



Рис. 5.4. Інфрачервоний обігрівач

На рис. 5.5 відображено схему лабораторної установки № 3 власної конструкції.

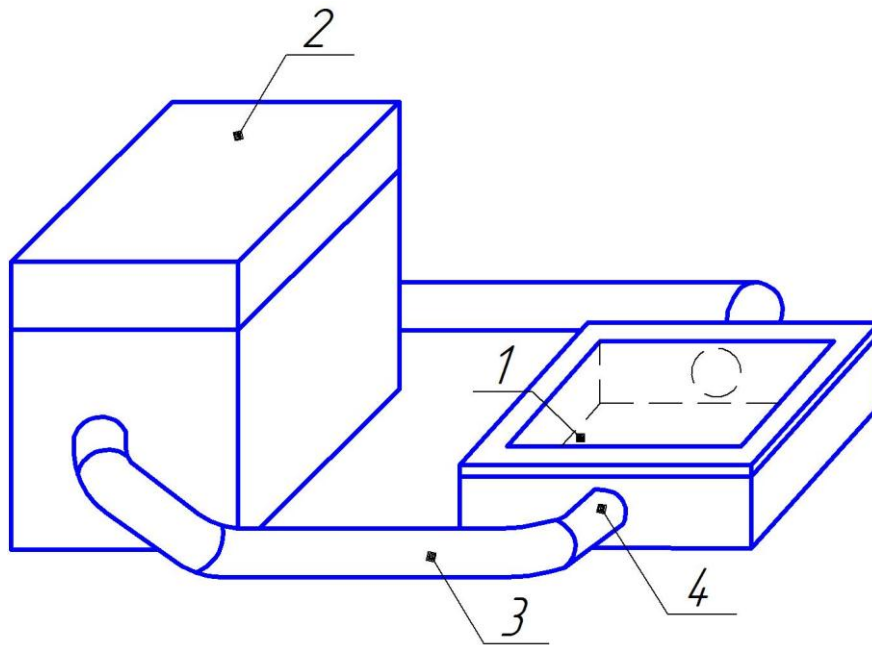


Рис. 5.5. Схема лабораторної установки № 3:

1 – колектор сонячної енергії власної конструкції;

2 – лабораторна камера;

3 – повітропровід;

4 – місце розташування осьового вентилятора

Відмінність третьої лабораторної установки від другої:

– у колекторі сонячної енергії використано склопакет;

– на внутрішніх бокових сторонах колектора сонячної енергії розміщено металеві теплосприймаючі пластини (на днищі колектора, як і в двох попередніх установках, також розміщено теплосприймаючу металеву пластину);

– бокові сторони та днище колектора сонячної енергії теплоізолювано.

На рис. 5.6 – 5.8 показано конструктивні елементи лабораторної установки № 3 власної конструкції.



Рис. 5.6. Колектор сонячної енергії № 3 власної конструкції



Рис. 5.7. Колектор сонячної енергії № 3 власної конструкції
(без склопакета – для відображення конструкції):

1 – осьовий вентилятор



Рис. 5.8. Лабораторна камера № 3

На рис. 5.9 показано лабораторну камеру подвійного призначення. У камері здійснювалося прискорення тверднення бетонних зразків внаслідок використання:

- або нагрітого повітря та теплоти гідратації цементу;
- або тільки теплоти гідратації цементу.

У дослідах, відображених на рис. 5.9, прискорення тверднення бетону здійснювалося з використанням тільки теплоти гідратації цементу.

а)



б)



Рис. 5.9. Лабораторна камера подвійного призначення:

- а) зразки гідроізольовано, датчики температури заглиблено в бетон;
- б) бетонні тротуарні плитки не гідроізольовано, датчики температури розміщено на їх поверхнях

На рис. 5.10 показано лабораторну камеру № 4 подвійного призначення: теплова обробка бетонних тротуарних плиток здійснюється або нагрітим повітрям (з подальшим термосним твердненням) або тільки з використанням теплоти гідратації цементу. У просторі між полицями і стінками камери передбачено розміщення теплоізоляційної конструкції, яка застосовується при тепловій обробці бетонних тротуарних плиток із використанням тільки теплоти гідратації цементу.



Рис. 5.10. Лабораторна камера № 4

Підсумки. Створено кілька лабораторних установок для проведення експериментальних досліджень теплової обробки:

– гідроізольованих бетонних зразків та бетонних виробів порівняно невеликих розмірів (наприклад, тротуарних плиток) із використанням нагрітого повітря та теплоти гідратації цементу;

– бетонних зразків та бетонних виробів порівняно невеликих розмірів із використанням теплоти гідратації цементу.

Дослідження можуть здійснюватися впродовж року.

Проаналізовано переваги та недоліки кожної з установок.

5.3. Експериментальні дослідження теплової обробки бетонних зразків та виробів із використанням нагрітого повітря

Досліджується тепла обробка в лабораторній установці гідроізольованих зразків із важкого бетону та бетонних тротуарних плиток. Теплоносій – нагріте повітря. У теплий період року для нагрівання повітря було використано колектор сонячної енергії. У холодний період року нагрівання повітря здійснювалося в тому ж колекторі за допомогою інфрачервоного обігрівача.

Приклад 5.1. Здійснювалася тепла обробка гідроізольованих зразків із важкого бетону (10×10×10 см) із використанням повітря, нагрітого за допомогою інфрачервоного обігрівача.

Попереднє витримування бетонних зразків до теплової обробки – 1 год; тепла обробка нагрітим повітрям бетонних зразків відбувалася впродовж 6 год; загальний термін перебування зразків у камері – 24 год.

Склад бетону: 1:2,01:4,17; Ц = 297 кг/м³; П = 598,1 кг/м³; Щ = 1238,5 кг/м³; В = 208 л/м³; В/Ц = 0,7; використано портландцемент ПЦ І-400-Н (ДСТУ Б В.2.7-46:2010).

У таблицях 5.1 – 5.4 наведено зміну температури бетонних зразків упродовж 6 годин їх теплової обробки нагрітим повітрям в лабораторній камері.

Таблиця 5.1

Зміна температури зразків із важкого бетону упродовж перших 75 хв

Температура бетону, °С	15,2	19,1	23,5	27,5	31,2	34,4
Зміна температури бетону упродовж 15 хв, °С	–	3,9	4,4	4,0	3,7	3,2
Сумарна зміна температури бетону, °С	–	3,9	8,3	12,3	16,0	19,2
Тривалість теплопостачання камери, хв	–	15	30	45	60	75

Таблиця 5.2

Зміна температури зразків із важкого бетону (90 – 165 хв)

Температура бетону, °С	37,3	39,8	42,0	44,1	46,1	47,9
Зміна температури бетону упродовж 15 хв, °С	2,9	2,5	2,2	2,1	2,0	1,8
Сумарна зміна температури бетону, °С	22,1	24,6	26,8	28,9	30,9	32,7
Тривалість теплопостачання камери, хв	90	105	120	135	150	165

Таблиця 5.3

Зміна температури зразків із важкого бетону (180 – 255 хв)

Температура бетону, °С	49,5	51,0	52,4	53,7	54,8	55,7
Зміна температури бетону упродовж 15 хв, °С	1,6	1,5	1,4	1,3	1,1	0,9
Сумарна зміна температури бетону, °С	34,3	35,8	37,2	38,5	39,6	40,5
Тривалість теплопостачання камери, хв	180	195	210	225	240	255

Таблиця 5.4

Зміна температури зразків із важкого бетону (270 – 360 хв)

Температура бетону, °С	56,5	57,3	58,1	58,8	59,5	60,1	60,6
Зміна температури бетону за 15 хв, °С	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,6	0,5
Сумарна зміна температури бетону, °С	41,3	42,1	42,9	43,6	44,3	44,9	45,4
Тривалість тепло- постачання камери, хв	270	285	300	315	330	345	360

У таблиці 5.5 наведено інтенсивність зниження температури бетонних зразків за останні 1,5 години перебування їх в лабораторній камері.

Таблиця 5.5

Зміна температури зразків із важкого бетону при остиганні з 22,5 до 24,0 год

Температура бетону, °С	23,4	23,0	22,6	22,2
Зміна температури бетону упродовж 30 хв, °С	–	– 0,4	– 0,4	– 0,4
Загальна тривалість тверднення бетонних зразків у лабораторній камері, год	22,5	23,0	23,5	24,0

Визначення міцності при стиску бетону здійснювалося через 4 год після розпалублення зразків. Цей показник становив 39,8% від міцності бетону контрольних зразків у віці 28 діб.

Приклад 5.2. Здійснювалася теплова обробка гідроізольованих зразків із важкого бетону (10×10×10 см) з використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії (досліди 1 – 6).

Мета експериментів: аналіз впливу досліджуваних режимів теплової обробки на інтенсивність набору бетоном міцності при стиску у віці 2, 5 та 28 діб. Склад бетону: 1:2,01:4,17; Ц = 297 кг/м³; П = 598,1 кг/м³; Щ = 1238,5 кг/м³; В = 208 л/м³; В/Ц = 0,7; використано портландцемент ПЦ І-400-Н (ДСТУ Б В.2.7-46:2010).

Попереднє витримування бетонних зразків до їх теплової обробки – 1 год. Нагріте в колекторі сонячної енергії повітря впродовж або 3, або 4,5, або 6 год спрямовувалося до камери за допомогою вентилятора. Загальний термін тверднення зразків у камері – 28 годин. Склад бетону: 1:2,01:4,17; Ц = 297 кг/м³; П = 598,1 кг/м³; Щ = 1238,5 кг/м³; В = 208 л/м³; В/Ц = 0,7; використано портландцемент ПЦ І-400-Н (ДСТУ Б В.2.7-46:2010).

Примітка. Нумерація дослідів стосується експериментальних досліджень, відображених в прикладах 5.2, 5.3.

На рис. 5.11 – 5.13 зображено зміну температури зразків із важкого бетону, теплова обробка яких нагрітим повітрям відбувалася впродовж 3 год.

У досліді 1 (рис. 5.11) температура бетонних зразків при їх тепловій обробці нагрітим повітрям упродовж 3 год підвищилася від 22,1 до 40,5°C ($\Delta t = 18,4^\circ\text{C}$).

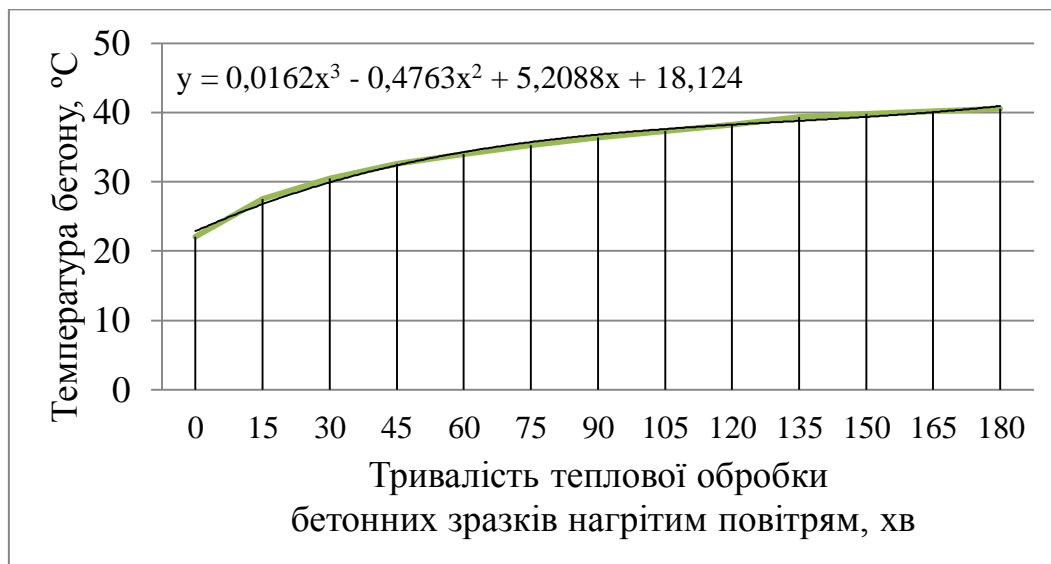


Рис. 5.11. Зміна температури бетонних зразків при тепловій обробці повітрям, нагрітим в колекторі сонячної енергії (дослід 1)

У досліді 2 (рис. 5.12) температура бетонних зразків при їх тепловій обробці нагрітим повітрям упродовж 3 год підвищилася від 21,9 до 37,6°C ($\Delta t = 15,7^\circ\text{C}$).

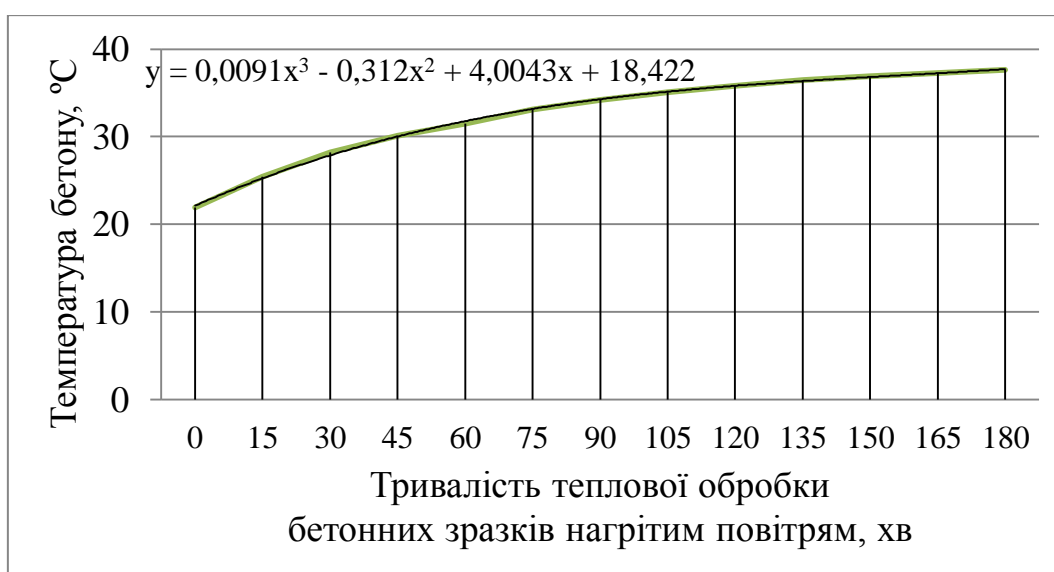


Рис. 5.12. Зміна температури бетонних зразків при тепловій обробці повітрям, нагрітим у колекторі сонячної енергії (дослід 2)

У досліді 3 (рис. 5.13) температура бетонних зразків при їх тепловій обробці нагрітим повітрям упродовж 3 год підвищилася від 22,3 до 41,2°C ($\Delta t = 18,9^\circ\text{C}$).

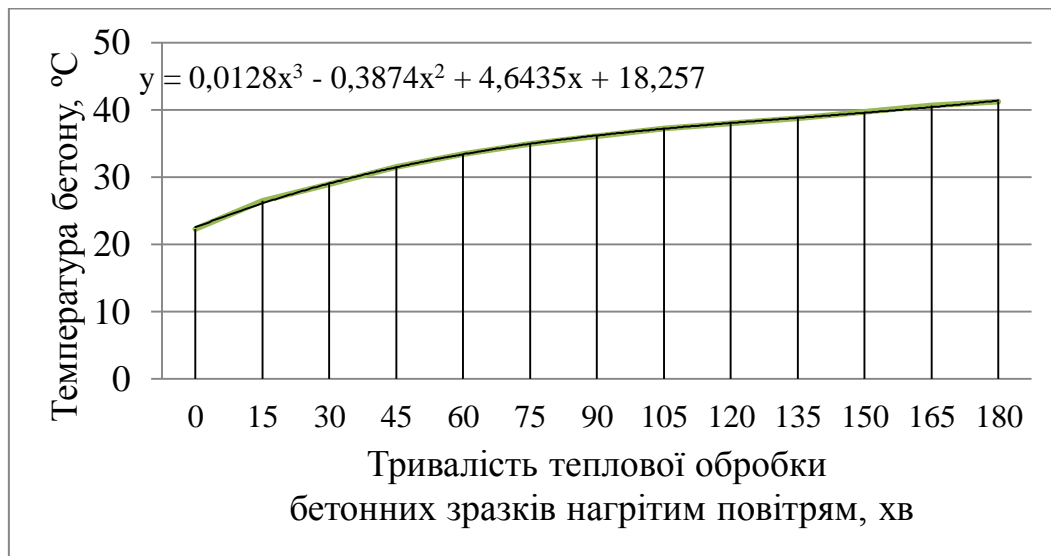


Рис. 5.13. Зміна температури бетонних зразків при тепловій обробці повітрям, нагрітим у колекторі сонячної енергії (дослід 3)

На рис. 5.14, 5.15 показано зміну температури зразків із важкого бетону досліджуваного складу, тепла обробка яких нагрітим у колекторі сонячної енергії повітрям відбувалася впродовж 4,5 год. У досліді 4 (рис. 5.14) температура бетону упродовж 4,5 год підвищилася від 22,7 до 38,1°C ($\Delta t = 15,4^\circ\text{C}$), в досліді 5 (рис. 5.15) – від 20,8 до 42,9°C ($\Delta t = 22,1^\circ\text{C}$).

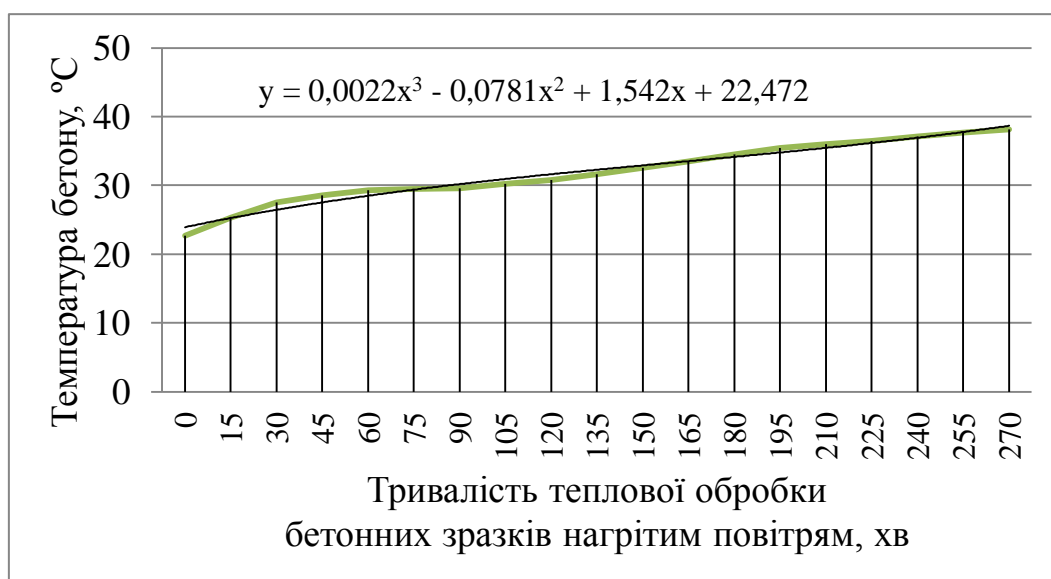


Рис. 5.14. Зміна температури бетонних зразків при тепловій обробці повітрям, нагрітим у колекторі сонячної енергії (дослід 4)

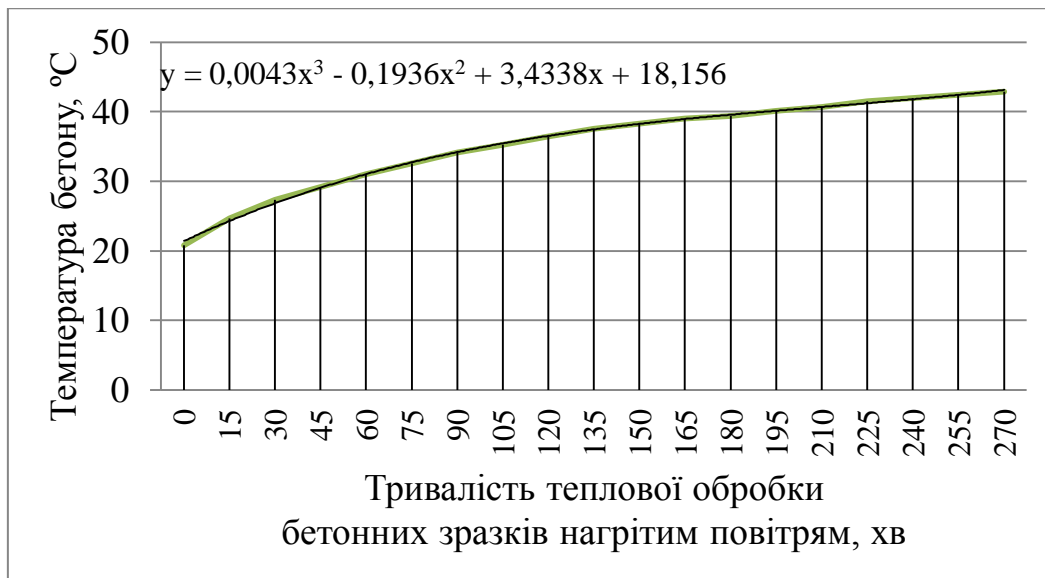


Рис. 5.15. Зміна температури бетонних зразків при тепловій обробці повітрям, нагрітим у колекторі сонячної енергії (дослід 5)

На рис. 5.16 показано зміну температури зразків із важкого бетону досліджуваного складу (дослід 6), тепла обробка яких нагрітим у колекторі сонячної енергії повітрям відбувалася впродовж 6 год (надалі зразки тверділи в камері). Температура зразків підвищилася впродовж 6 год від 20,1 до 48,4°C ($\Delta t = 28,3$ °C).

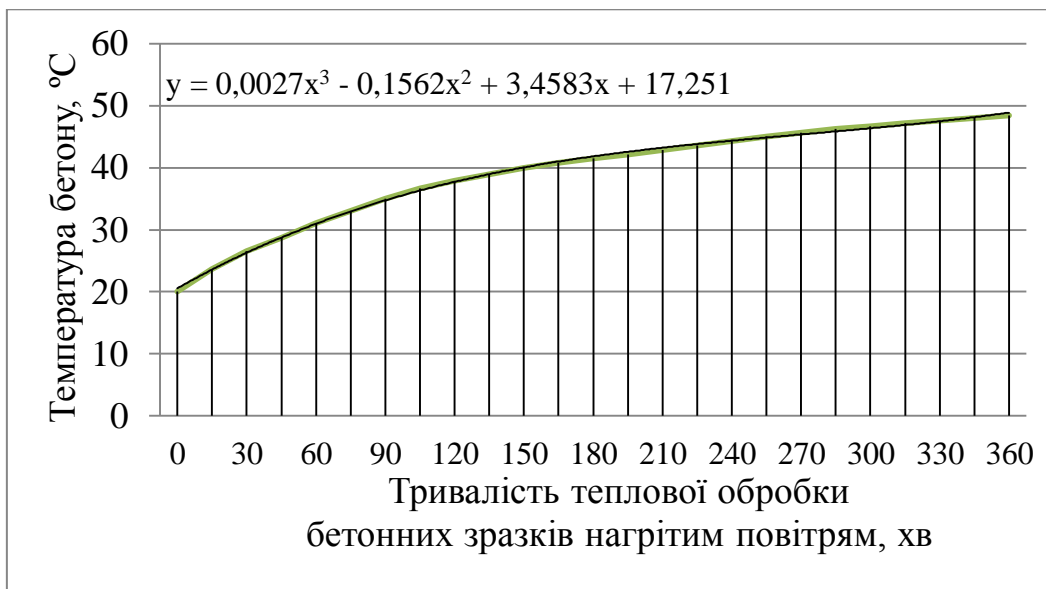


Рисунок 5.16. Зміна температури бетонних зразків при тепловій обробці повітрям, нагрітим у колекторі сонячної енергії (дослід 6)

На рис. 5.17 відображено зміну температури зразків упродовж їх теплової обробки повітрям, нагрітим у колекторі сонячної енергії (досліди 1, 2, 4).

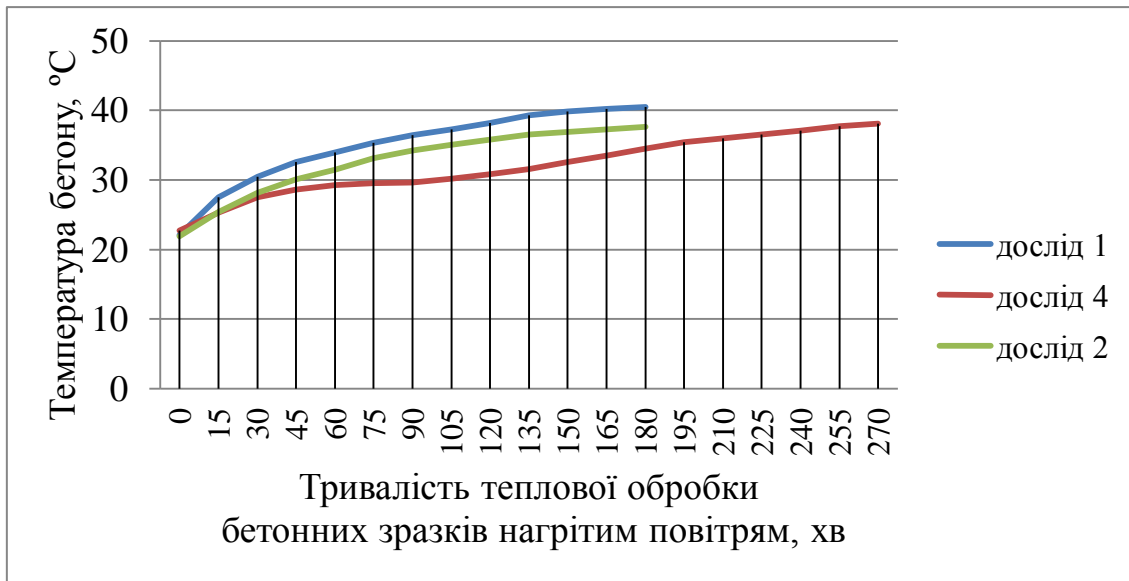


Рис. 5.17. Зміна температури бетонних зразків при тепловій обробці повітрям, нагрітим у колекторі сонячної енергії (досліди 1, 2, 4)

На рис. 5.18 показано міцність бетону при стиску у віці 2 діб (у відсотках від проектної міцності): контрольних зразків; зразків, теплова обробка яких здійснювалася нагрітим у колекторі сонячної енергії повітрям (досліди 1, 2, 4). Міцність бетону при стиску в досліді 1 більша, ніж міцність бетону контрольних зразків, в 1,58 разу, в досліді 2 – в 1,53 разу, в досліді 4 – в 1,55 разу.

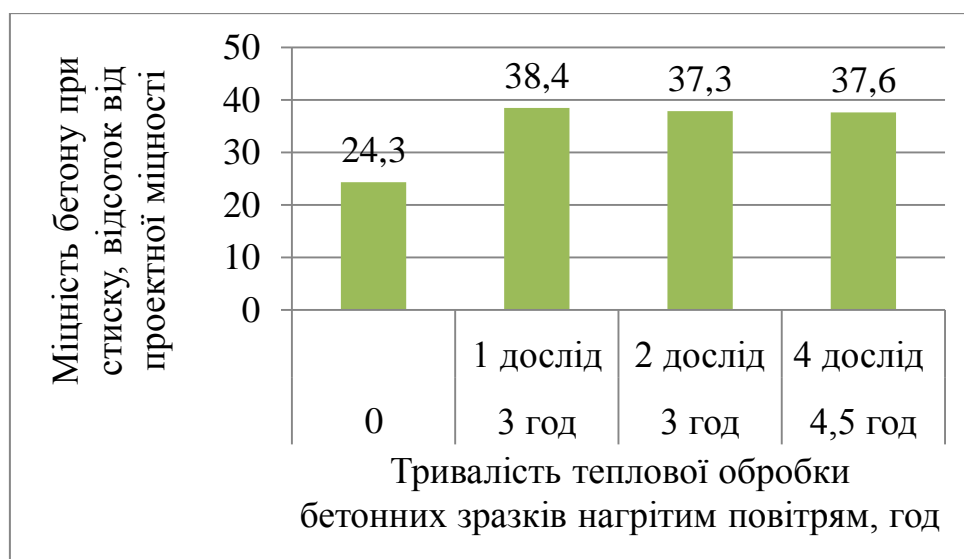


Рис. 5.18. Міцність бетону при стиску у віці 2 діб, відсоток від проектної міцності (досліди 1, 2, 4)

На рис. 5.19 відображено зміну температури зразків упродовж їх теплової обробки повітрям, нагрітим у колекторі сонячної енергії (досліди 3, 5, 6).

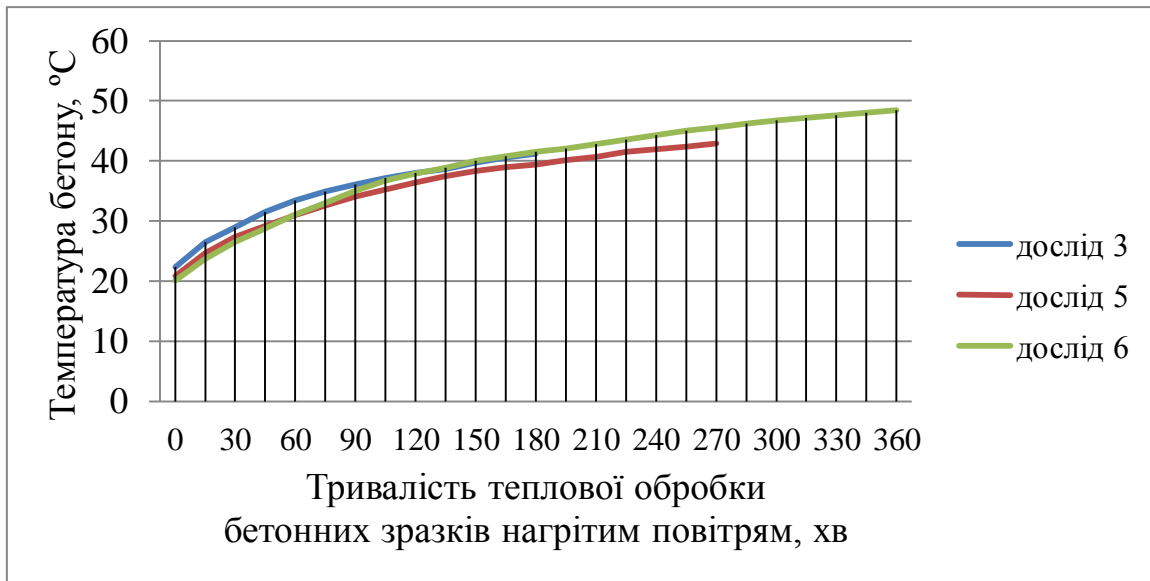


Рис. 5.19. Зміна температури бетонних зразків при тепловій обробці повітрям, нагрітим у колекторі сонячної енергії (досліди 3, 5, 6)

На рис. 5.20 показано міцність бетону при стиску у віці 5 діб (у відсотках від проектної міцності): контрольних зразків; зразків, теплова обробка яких здійснювалася нагрітим у колекторі сонячної енергії повітрям (досліди 3, 5, 6). Міцність бетону при стиску в досліді 3 більша, ніж міцність бетону контрольних зразків, в 1,31 разу, в досліді 5 – в 1,33 разу, в досліді 6 – в 1,41 разу.

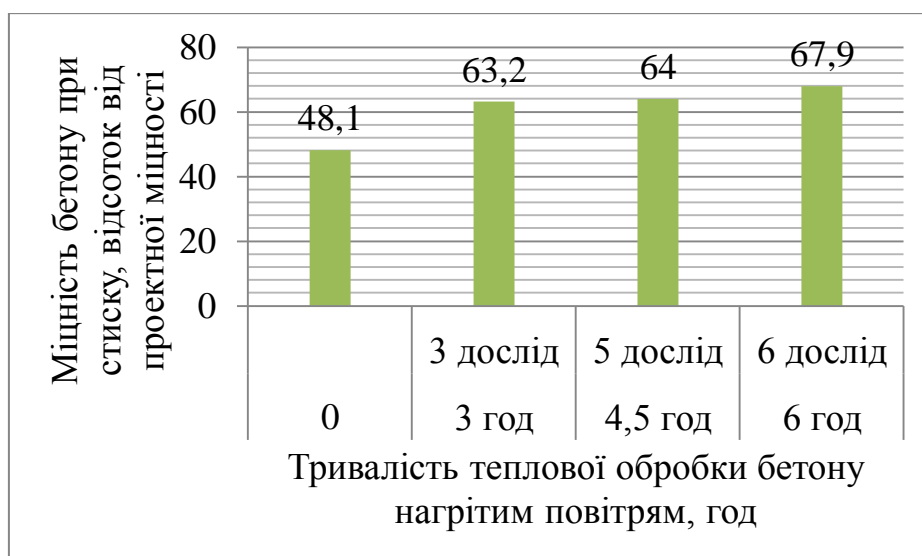


Рис. 5.20. Міцність бетону при стиску у віці 5 діб, відсоток від проектної міцності (досліди 3, 5, 6)

У віці 28 діб різниця між міцністю при стиску бетону зразків, котрі тверділи в лабораторній камері впродовж доби, та міцністю при стиску бетону зразків, які тверділи в повітряних умовах:

- при неінтенсивній тепловій обробці бетонних зразків була відсутня;
- при їх порівняно інтенсивній тепловій обробці не перевищувала 7%.

Приклад 5.3. Здійснювалася тепла обробка гідроізольованих зразків із важкого бетону (10×10×10 см) з використанням повітря, нагрітого за допомогою інфрачервоного обігрівача (досліди 7 – 14). Мета експериментів: аналіз впливу досліджуваних режимів теплової обробки на інтенсивність набору бетоном міцності при стиску у віці 2, 5 та 28 діб. Склад бетону такий, як у дослідях 1 – 6. Попереднє витримування бетонних зразків до їх теплової обробки – 1 год. Нагріте повітря впродовж або 3, або 4,5, або 6 год спрямовувалося до камери. Загальний термін перебування зразків у камері – 28 годин.

На рис. 5.21 – 5.24 зображено зміну температури бетонних зразків, тепла обробка яких упродовж 3 год здійснювалася нагрітим повітрям. У досліді 7 (рис. 5.21) температура бетонних зразків при їх тепловій обробці нагрітим повітрям упродовж 3 год підвищилася від 16,0 до 33,9°C ($\Delta t = 17,9^\circ\text{C}$).

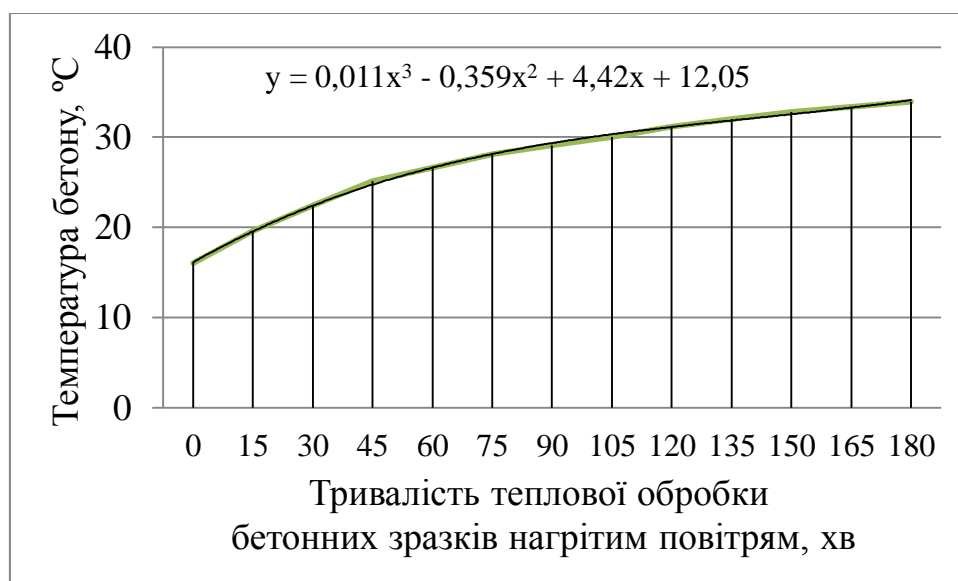


Рис. 5.21. Зміна температури бетонних зразків при тепловій обробці повітрям, нагрітим у колекторі за допомогою інфрачервоного обігрівача (дослід 7)

У досліді 8 (рис. 5.22) температура бетонних зразків при їх тепловій обробці нагрітим повітрям упродовж 3 год підвищилася від 14,9 до 47,8°C ($\Delta t = 32,9^\circ\text{C}$).

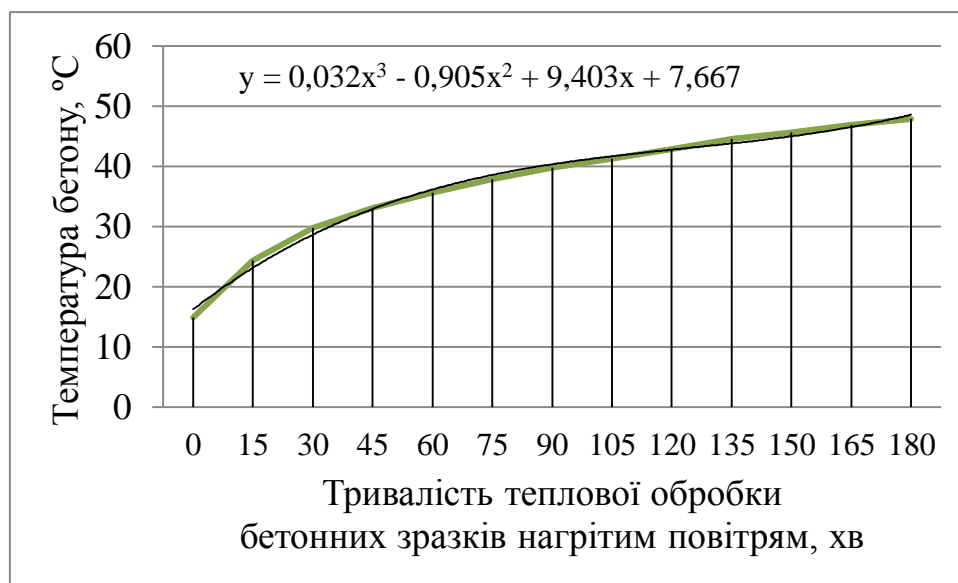


Рис. 5.22. Зміна температури бетонних зразків при тепловій обробці повітрям, нагрітим у колекторі за допомогою інфрачервоного обігрівача (дослід 8)

У досліді 9 (рис. 5.23) температура бетонних зразків при їх тепловій обробці нагрітим повітрям упродовж 3 год підвищилася від 16,8 до 49,5°C ($\Delta t = 32,7^\circ\text{C}$).

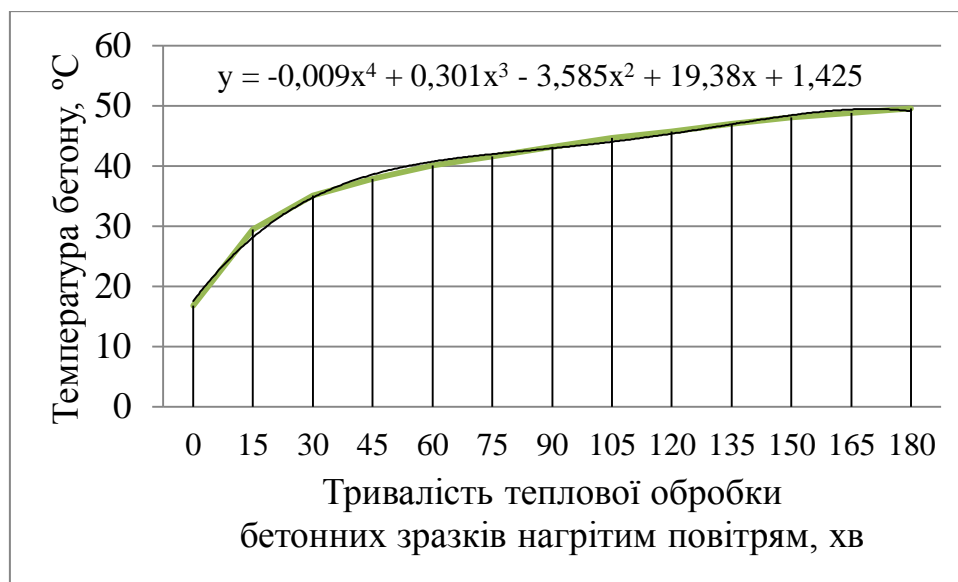


Рис. 5.23. Зміна температури бетонних зразків при тепловій обробці повітрям, нагрітим у колекторі за допомогою інфрачервоного обігрівача (дослід 9)

У досліді 10 (рис. 5.24) температура бетонних зразків при їх тепловій обробці нагрітим повітрям упродовж 3 год підвищилася від 16,0 до 53,4°C ($\Delta t = 37,4^\circ\text{C}$).

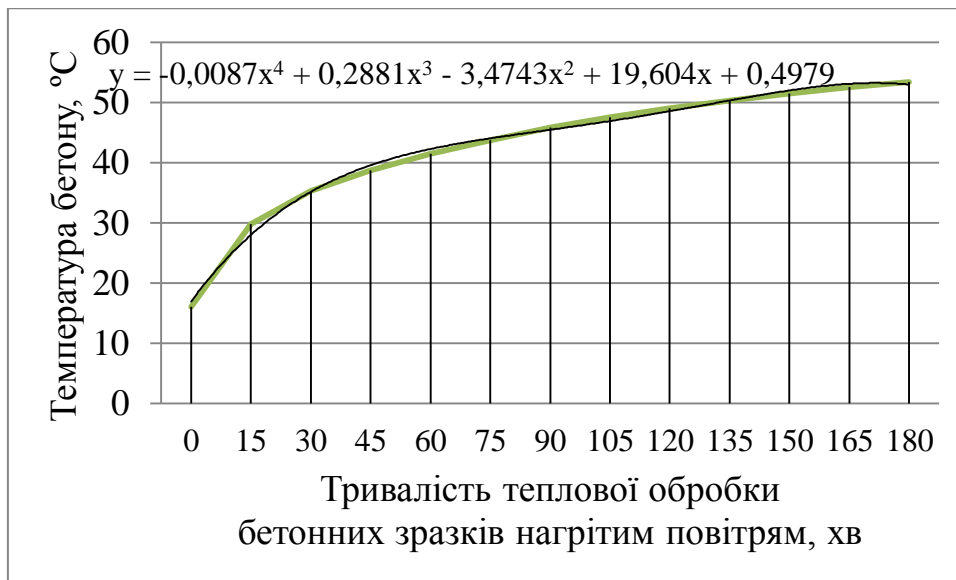


Рис. 5.24. Зміна температури бетонних зразків при тепловій обробці повітрям, нагрітим у колекторі за допомогою інфрачервоного обігрівача (дослід 10)

На рис. 5.25, 5.26 показано зміну температури зразків із важкого бетону досліджуваного складу, тепла обробка яких нагрітим повітрям відбувалася впродовж 4,5 год (надалі зразки тверділи в камері). У досліді 11 (рис. 5.25) температура бетонних зразків при їх тепловій обробці нагрітим повітрям упродовж 4,5 год підвищилася від 14,4 до 35,5°C ($\Delta t = 21,1^\circ\text{C}$), в досліді 12 (рис. 5.26) – від 16,3 до 56,4°C ($\Delta t = 40,1^\circ\text{C}$).

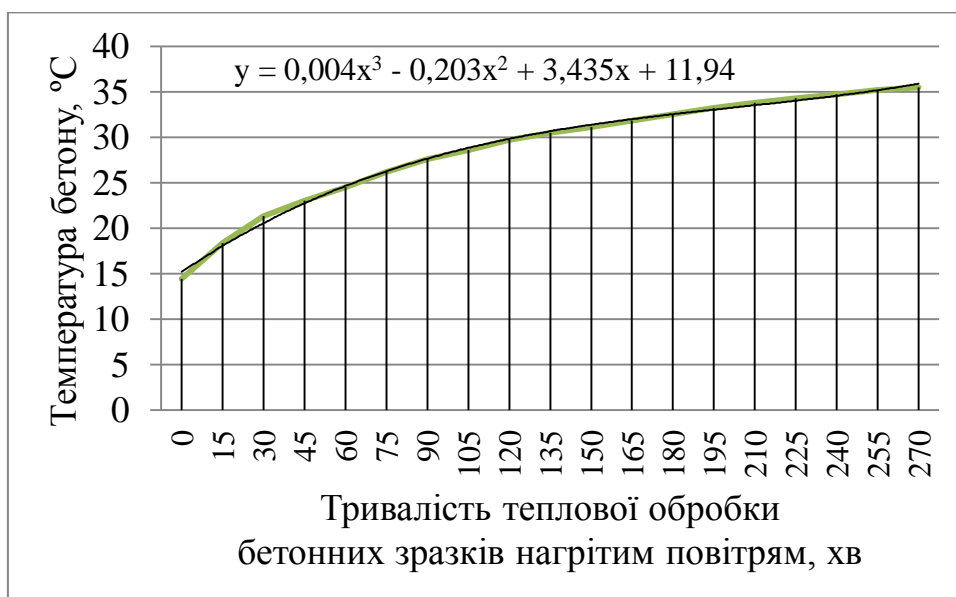


Рис. 5.25. Зміна температури бетонних зразків при тепловій обробці повітрям, нагрітим у колекторі за допомогою інфрачервоного обігрівача (дослід 11)

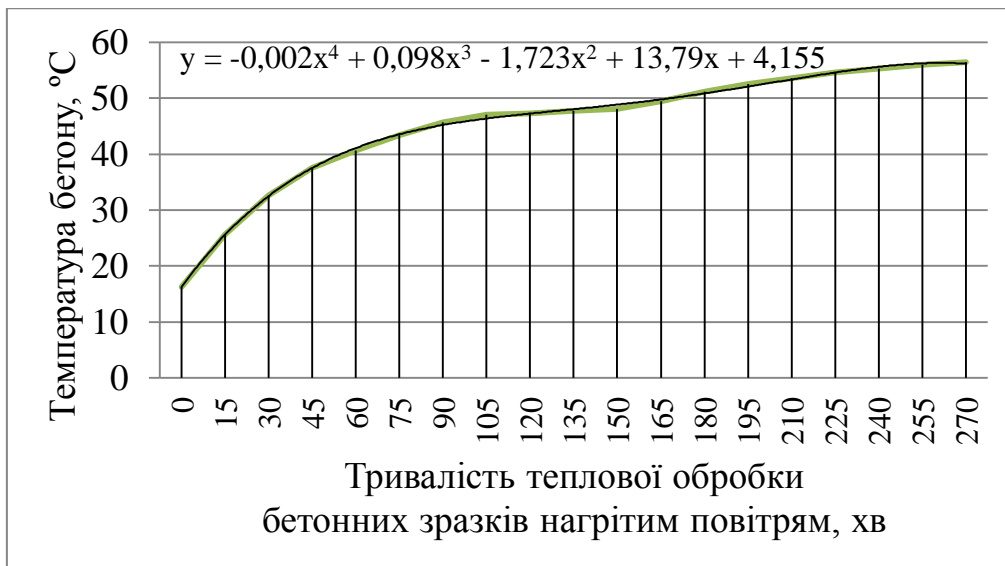


Рис. 5.26. Зміна температури бетонних зразків при тепловій обробці повітрям, нагрітим у колекторі за допомогою інфрачервоного обігрівача (дослід 12)

На рис. 5.27, 5.28 показано зміну температури зразків із важкого бетону досліджуваного складу, тепла обробка яких нагрітим повітрям відбувалася впродовж 6 год (надалі зразки тверділи в камері). У досліді 13 (рис. 5.27) температура бетонних зразків при їх тепловій обробці нагрітим повітрям упродовж 6 год підвищилася від 15,3 до 39,1°С ($\Delta t = 23,8^{\circ}\text{C}$), в досліді 14 (рис. 5.28) – від 14,5 до 60,8°С ($\Delta t = 46,3^{\circ}\text{C}$).

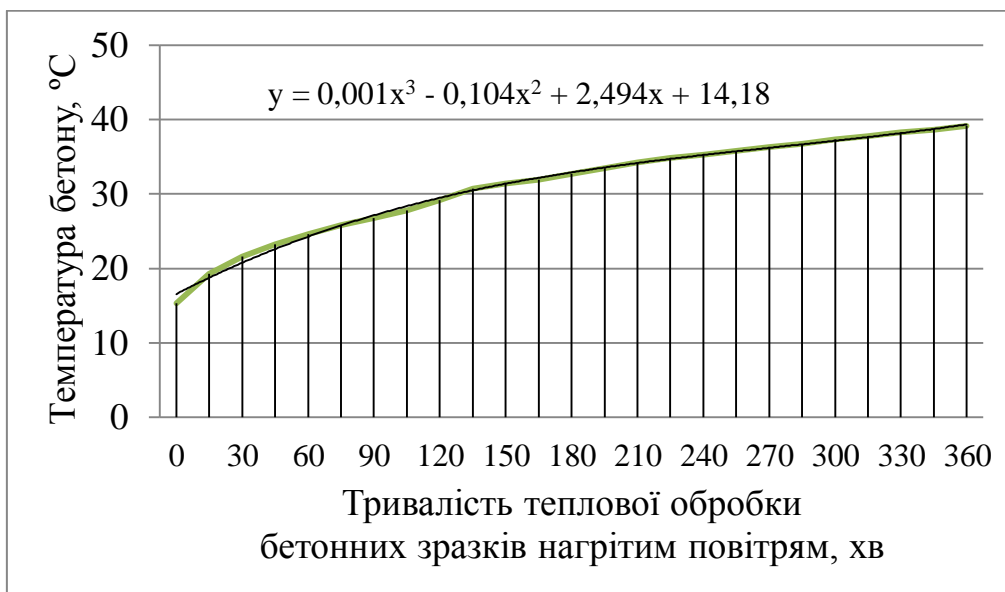


Рис. 5.27. Зміна температури бетонних зразків при тепловій обробці повітрям, нагрітим у колекторі за допомогою інфрачервоного обігрівача (дослід 13)

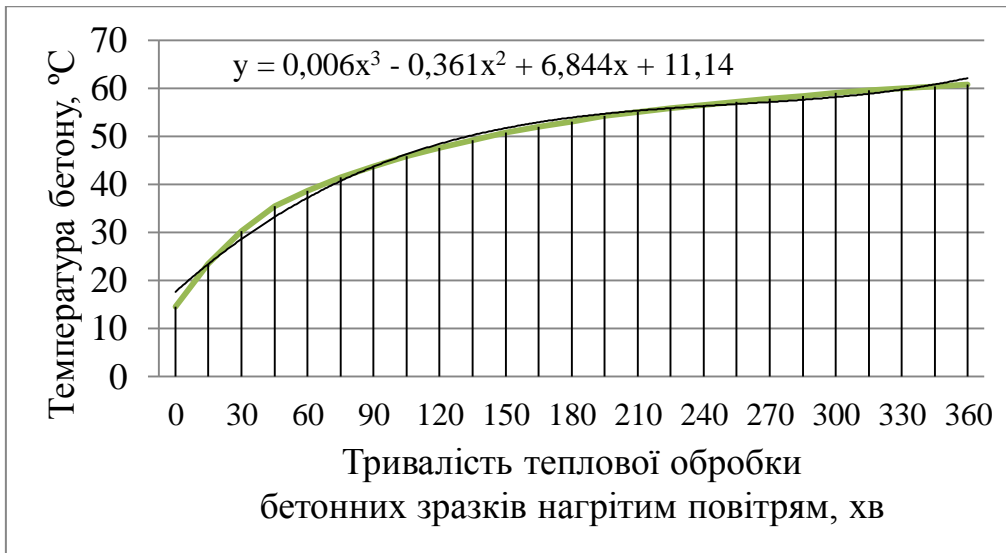


Рис. 5.28. Зміна температури бетонних зразків при тепловій обробці повітрям, нагрітим у колекторі за допомогою інфрачервоного обігрівача (дослід 14)

На рис. 5.29 відображено зміну температури зразків із важкого бетону досліджуваного складу впродовж терміну їх теплової обробки нагрітим повітрям (досліди 7, 8, 10, 11, 13).

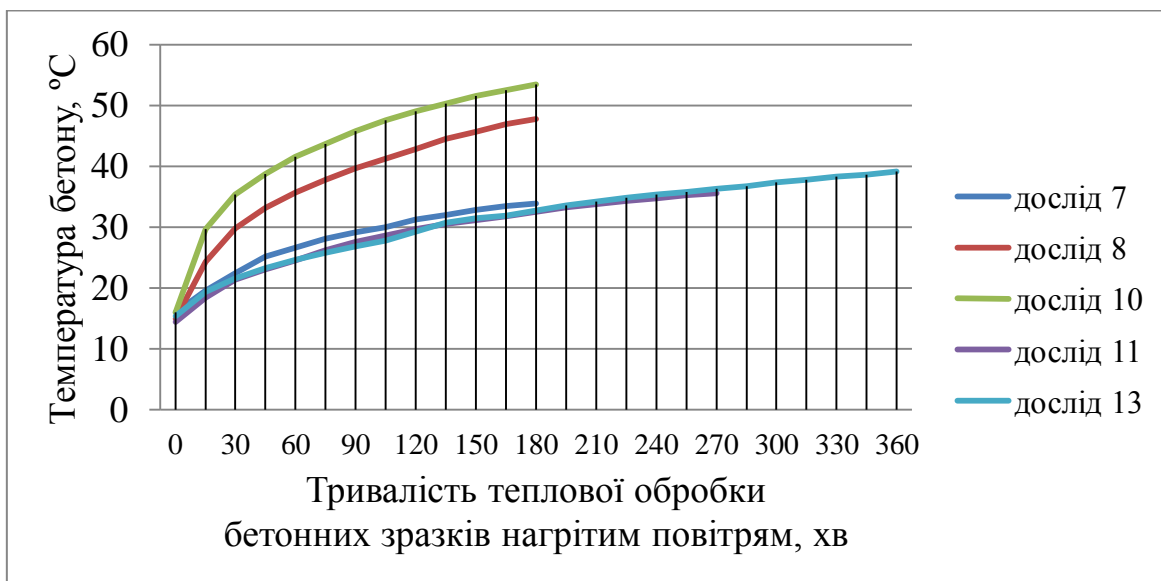


Рис. 5.29. Зміна температури бетонних зразків при тепловій обробці повітрям, нагрітим у колекторі за допомогою інфрачервоного обігрівача (досліди 7, 8, 10, 11, 13)

На рис. 5.30 показано міцність бетону при стиску у віці 2 діб (у відсотках від проектної міцності): контрольних зразків; зразків, теплова обробка яких здійснювалася повітрям, нагрітим у колекторі за допомогою інфрачервоного

обігрівача (досліди 7, 8, 10, 11, 13). Міцність бетону при стиску в досліді 7 більша, ніж міцність бетону контрольних зразків, в 1,63 разу, в досліді 8 – в 2,06 разу, в досліді 10 – в 2,13 разу, в досліді 11 – в 1,66 разу, в досліді 13 – в 1,80 разу.

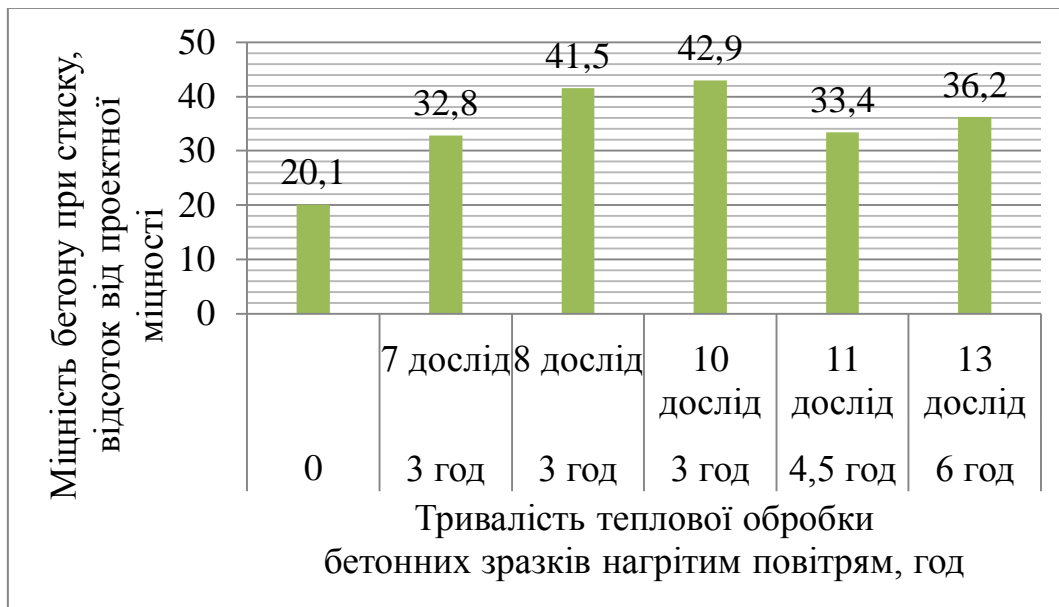


Рис. 5.30. Міцність бетону при стиску у віці 2 діб, відсоток від проектної міцності (досліди 7, 8, 10, 11, 13)

На рис. 5.31 відображено зміну температури зразків із важкого бетону досліджуваного складу впродовж терміну їх теплової обробки нагрітим повітрям (досліди 9, 12, 14).

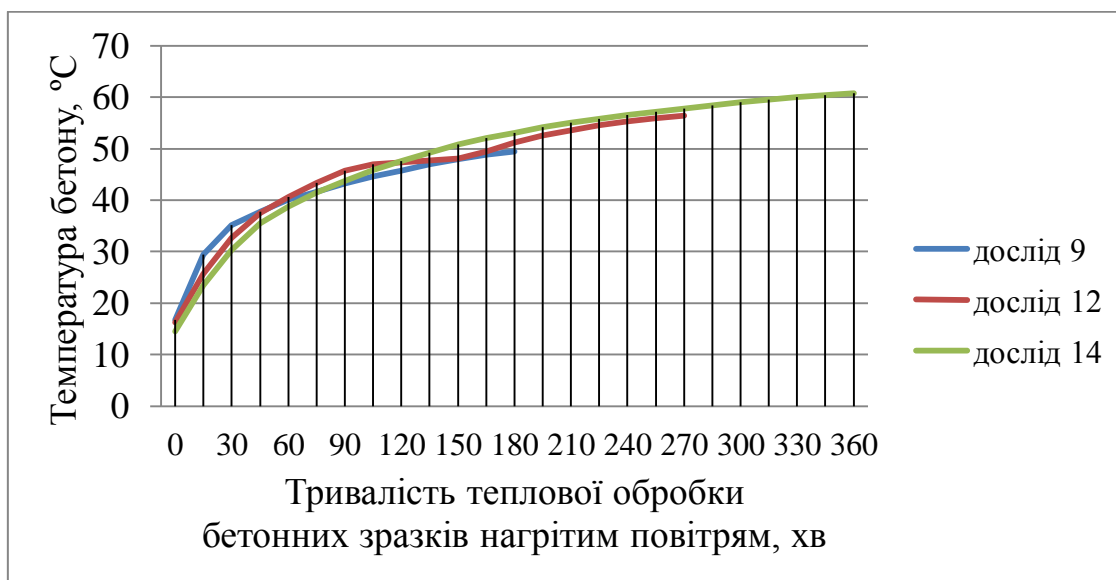


Рис. 5.31. Зміна температури бетонних зразків при тепловій обробці повітрям, нагрітим за допомогою інфрачервоного обігрівача (досліди 9,12,14)

На рис. 5.32 показано міцність бетону при стиску у віці 5 діб (у відсотках від проектної міцності): контрольних зразків; зразків, теплова обробка яких здійснювалася повітрям, нагрітим у колекторі за допомогою інфрачервоного обігрівача (досліди 9, 12, 14). Міцність бетону при стиску в досліді 9 більша, ніж міцність бетону контрольних зразків, в 1,59 разу, в досліді 12 – в 1,75 разу, в досліді 14 – в 1,89 разу.

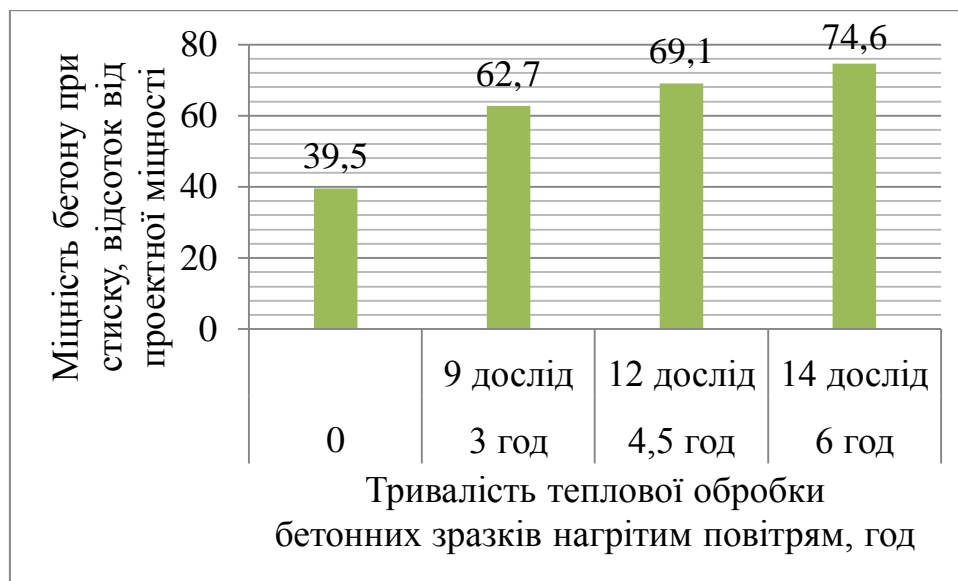


Рис. 5.32. Міцність бетону при стиску у віці 5 діб, відсоток від проектної міцності (досліди 9, 12, 14)

У віці 28 діб різниця між міцністю при стиску бетону зразків, котрі тверділи в лабораторній камері упродовж доби, та міцністю при стиску бетону зразків, котрі тверділи в повітряних умовах:

- при неінтенсивній тепловій обробці бетонних зразків була відсутня;
- при їх порівняно інтенсивній тепловій обробці не перевищувала 9%.

У теплий період року міцність при стиску контрольних зразків із важкого бетону досліджуваного складу у віці 2 та 5 діб більша, ніж відповідна міцність у холодний період (приклади 5.2, 5.3). Пояснюється це тим, що в теплий період року температурний режим тверднення контрольних зразків більш сприятливий, ніж у холодний період.

Приклад 5.4. Здійснювалася теплова обробка гідроізольованих бетонних тротуарних плиток (20×10×4 см) із використанням повітря, нагрітого за допомогою інфрачервоного обігрівача. Мета експериментів – визначення впливу досліджуваної теплової обробки на інтенсивність набору бетоном міцності при стиску у віці 1, 3, 7 та 28 діб. Склад бетону: 1:1,33:2,41; Ц = 485,9 кг/м³; П = 644,0 кг/м³; Щ = 1171,9 кг/м³; В/Ц = 0,30; використано портландцемент ПЦ І-500-Н (ДСТУ Б В.2.7-46:2010); хімічні добавки: суперпластифікатор на основі полікарбоксилату; прискорювач тверднення цементу на основі тіосульфата і роданіда натрію (вміст – згідно з рекомендаціями виробника).

Попереднє витримування бетонних плиток до їх теплової обробки не здійснювалося. Тривалість теплової обробки бетонних плиток нагрітим повітрям – 4,5 год (рис. 5.33). За цей термін температура бетонних плиток підвищилася від 16,5 до 38,1°С ($\Delta t = 21,6^{\circ}\text{C}$). Тривалість тверднення плиток в камері – одна доба.

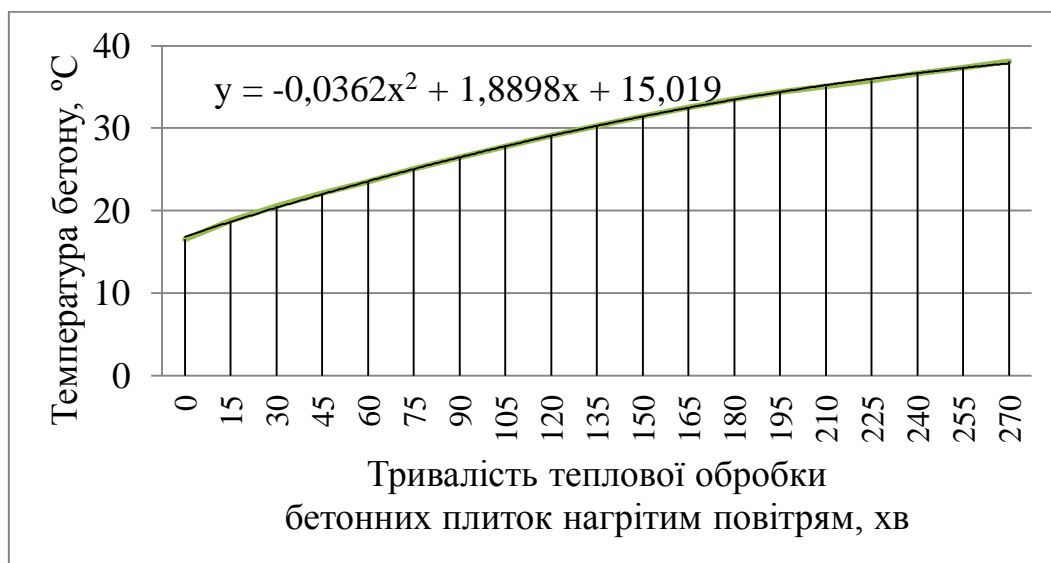


Рис. 5.33. Зміна температури бетонних тротуарних плиток при тепловій обробці повітрям, нагрітим за допомогою інфрачервоного обігрівача (приклад 5.4)

На рис. 5.34 показано порівняння міцності при стиску бетону тротуарних плиток, які першу добу тверділи в лабораторній камері (надалі плитку тверділи в повітряних умовах), та міцності при стиску бетону тротуарних плиток, котрі тверділи в повітряних умовах.

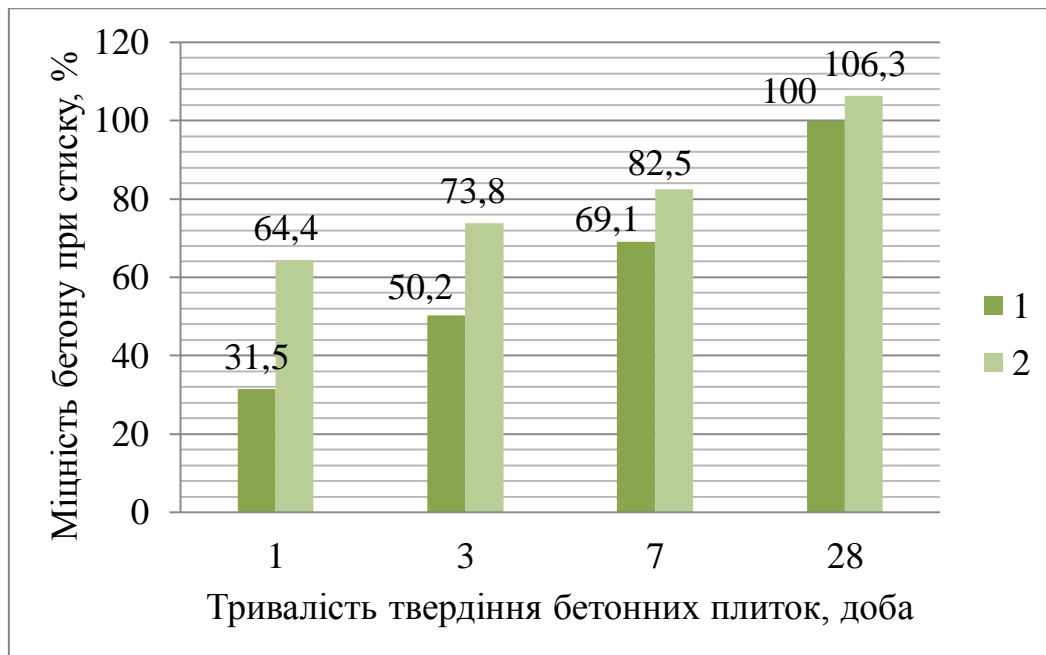


Рис. 5.34. Міцність бетону при стиску (приклад 5.4):

1 – тверднення бетонних плиток в повітряних умовах

2 – перша доба: тверднення бетонних плиток у тепловій камері
(надалі плитки тверділи в повітряних умовах)

Міцність при стиску бетону тротуарних плиток досліджуваного складу у віці 1 доби більша, ніж міцність при стиску бетону контрольних плиток, у 2,04 разу, у віці 3 діб – в 1,47 разу, у віці 7 діб – в 1,19 разу, у віці 28 діб – в 1,06 разу.

Підсумки:

1. У лабораторних камерах здійснено теплову обробку гідроізольованих бетонних зразків та тротуарних плиток із використанням нагрітого повітря.

Загальна мета цих досліджень – визначення кінетики тверднення бетонних зразків і тротуарних плиток упродовж 28 діб, якщо:

– попереднє витримування бетонних зразків до теплової обробки – 1 год (приклади 5.1 – 5.3); попереднє витримування бетонних плиток не здійснювалося (приклад 5.4);

– тепла обробка нагрітим повітрям бетонних зразків тривала або 3, або 4,5, або 6 год (приклади 5.1 – 5.3), бетонних плиток – 4,5 год (приклад 5.4);

надалі відбувалося їх термосне тверднення в лабораторній камері; загальний термін перебування зразків у камері – 24 або 28 год, бетонних плиток – 24 год.

Мінімальна температура нагрівання бетону в наведених дослідах дорівнювала 33,9°C, а максимальна становила 60,8°C.

Слід підкреслити, що тривалі досліди при температурі повітря, яка перевищує температуру, рекомендовану для роботи вентиляторів (котрі використовувалися в дослідженнях) не проводилися.

2. Міцність при стиску бетону тротуарних плиток (приклад 5.4), тверднення яких відбувалося одну добу в тепловій камері, після їх розпалублення була більшою, ніж міцність при стиску бетону контрольних плиток, у 2,04 разу. Надалі різниця між цими показниками поступово зменшувалася, і у віці 28 діб була порівняно незначною (6,3%).

3. Міцність при стиску бетону зразків, тверднення яких відбувалося в тепловій камері впродовж 28 год (приклади 5.2, 5.3), через 2 доби була більшою, ніж у контрольних зразків, в 1,31 – 2,13 разу (залежно від інтенсивності та тривалості їх теплової обробки нагрітим повітрям). Надалі різниця між цими показниками поступово зменшувалася, і у віці 28 діб:

- при неінтенсивній тепловій обробці бетонних зразків була відсутня;
- при їх порівняно інтенсивній тепловій обробці не перевищувала 7 – 9%.

4. Підтверджено, що при тепловій обробці бетонних зразків і бетонних тротуарних плиток вплив на міцність бетону при стиску має інтенсивність та тривалість їх теплової обробки нагрітим повітрям (за інших рівних факторів), а також:

а) наявність періоду термосного тверднення, наприклад:

– міцність при стиску бетону зразків у віці 2 діб, тепла обробка яких нагрітим повітрям відбувалася впродовж 4,5 год (дослід 11) та впродовж 6 год (дослід 13), менша, ніж відповідна міцність бетону зразків, тепла обробка котрих здійснювалася нагрітим повітрям упродовж 3 год (досліди 8, 10); пояснюється це тим, що в дослідах 11 і 13 бетонні зразки перед припиненням

подачі повітря в установку мали температуру, нижчу, ніж у дослідах 8 та 10 (приклад 5.3);

– тривалість теплової обробки нагрітим повітрям у досліді 13 становить 6 год, що вдвічі більше, ніж у досліді 7, але міцність бетону зразків при стиску у віці 2 діб у цих дослідах різняться не настільки суттєво (приклад 5.3); це пояснюється наявністю періоду термосного тверднення бетонних зразків;

б) температура повітря в приміщенні, де розташовано лабораторну установку, наприклад:

– міцність при стиску бетону зразків у віці 2 діб, тепла обробка яких нагрітим повітрям здійснювалася впродовж 3 год, у дослідах 8 і 10 різняться незначно, хоча температура бетонних зразків перед припиненням подачі повітря в досліді 8 нижча, а в досліді 10; пояснюється це тим, що температура навколишнього середовища в досліді 10 була нижчою, ніж у досліді 8, що збільшувало інтенсивність втрат теплоти камерою в навколишнє середовище в період термосного тверднення бетонних зразків (приклад 5.3);

– міцність при стиску бетону зразків у віці 2 діб, тепла обробка яких нагрітим повітрям здійснювалася впродовж 3 год (дослід 7) та впродовж 4,5 год (дослід 11), різняться незначно, оскільки температура навколишнього середовища в досліді 11 була нижчою, ніж у досліді 7, що збільшувало інтенсивність втрат теплоти камерою в навколишнє середовище в період термосного тверднення бетонних зразків (приклад 5.3);

в) початкова температура бетонної суміші та умови тверднення бетонних зразків і виробів після їх розпалублення й т.ін.

5. Витрата електричної енергії при тепловій обробці нагрітим повітрям бетонних зразків і тротуарних плиток (обумовлена використанням вентилятора) не перевищувала 0,01% від кількості енергії, потрібної для їх теплової обробки (приклади 5.1 – 5.4).

5.4. Експериментальні дослідження теплової обробки

бетонних зразків та виробів із використанням теплоти гідrataції цементу

Приклад 5.5. Мета досліджень:

– опрацювати метод визначення тепловиділення цементу при гідrataції (з урахуванням особливостей теплообміну між зовнішніми поверхнями лабораторної камери та навколишнім середовищем);

– встановити співвідношення між міцністю при стиску бетону зразків, котрі тверділи в тепловій камері та в повітряних умовах: неруйнівним методом – після їх розпалублення і через 3, 7, 14 діб; руйнівним методом – через 28 діб.

Експерименти здійснювалися з використанням зразків-кубів із важкого бетону (15×15×15 см).

На рис. 5.35 показано зміну температури важкого бетону, прискорення тверднення якого відбувалося в теплоізоляційній камері впродовж 46 годин. Склад бетону: 1:1,21:2,66; Ц = 450 кг/м³; П = 542,7 кг/м³; ШЦ = 1195 кг/м³; В = 202,5 л/м³; В/Ц = 0,45. Використано портландцемент ПЦ I-500-Н (ДСТУ Б В.2.7-46:2010).

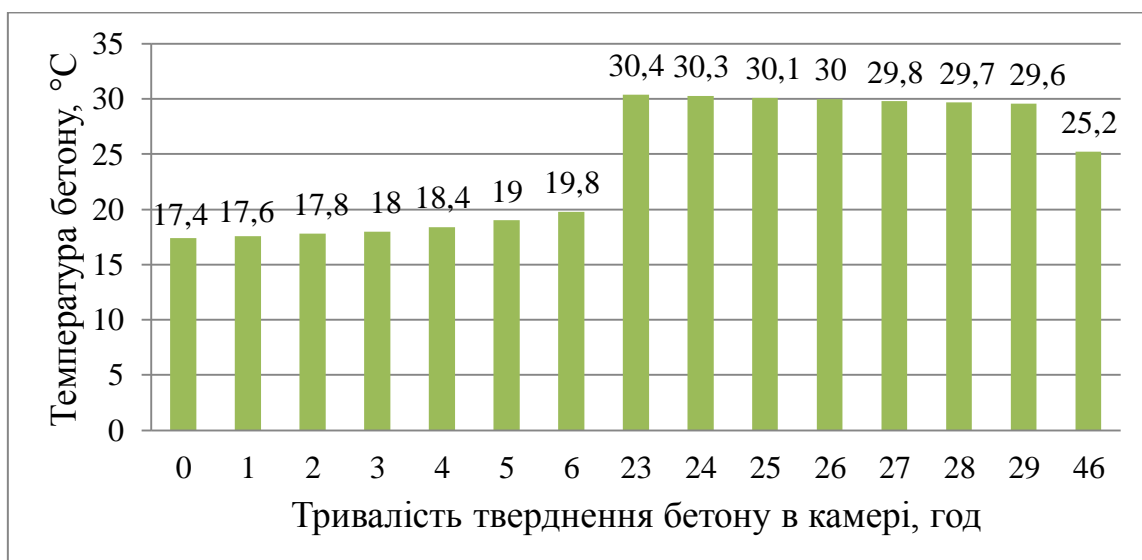


Рис. 5.35. Зміна температури важкого бетону (Ц = 450 кг/м³, В/Ц = 0,45)

Упродовж 6 годин температура бетону підвищилася з 17,4 до 19,8°C ($\Delta t = 2,4^\circ\text{C}$). Через 23 години температура бетону становила 30,4°C ($\Delta t = 13,0^\circ\text{C}$), а потім поступово знижувалася.

Міцність при стиску бетону зразків ($\rho = 450 \text{ кг/м}^3$, $V/\rho = 0,45$), тверднення яких відбувалося в теплоізоляційній камері, була більшою, ніж міцність при стиску бетону зразків, котрі тверділи в повітряних умовах:

– після їх розпалублення в середньому в 1,51 разу (на 33,7%, якщо за 100% прийнято міцність при стиску бетону зразків, котрі тверділи в теплоізоляційній камері);

– у віці 3 діб – в 1,18 разу.

У віці 7, 14 та 28 діб різниця між указаними показниками відсутня.

На рис. 5.36 показано зміну температури важкого бетону, прискорення тверднення якого відбувалося в теплоізоляційній камері впродовж 48 годин. Склад бетону: 1:0,94:2,66; $\rho = 450 \text{ кг/м}^3$; $\rho = 423 \text{ кг/м}^3$; $\rho = 1195 \text{ кг/м}^3$; $V = 247,5 \text{ л/м}^3$; $V/\rho = 0,55$; перерахунок вмісту піску (обумовлений зміною V/ρ) здійснювався відносно складу бетону з $V/\rho = 0,45$.

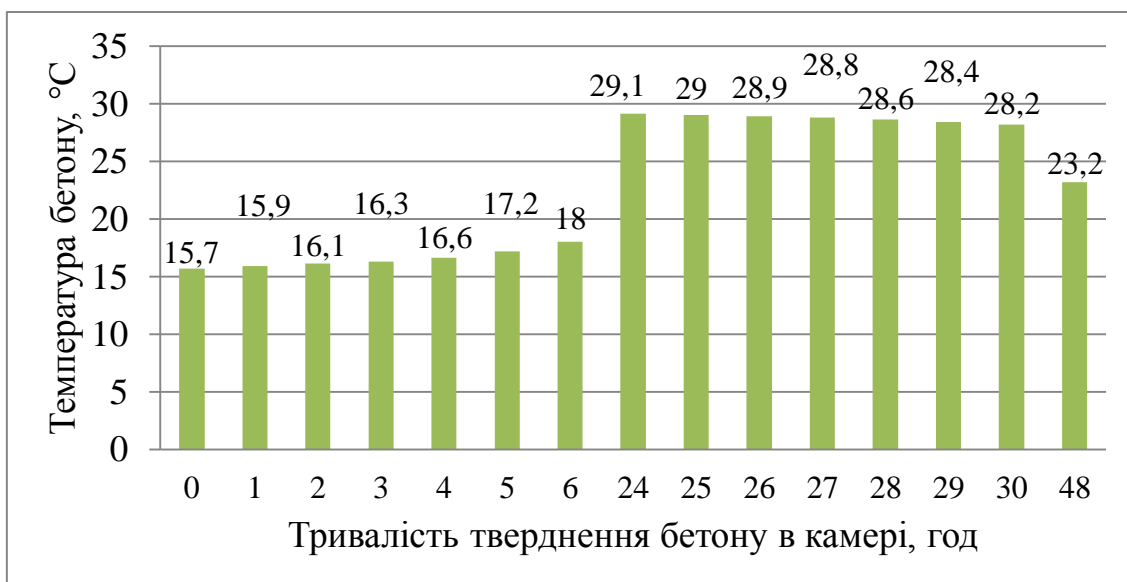


Рис. 5.36. Зміна температури важкого бетону ($\rho = 450 \text{ кг/м}^3$, $V/\rho = 0,55$)

Упродовж 6 годин температура бетону підвищилася з 15,7 до 18,0°C ($\Delta t = 2,3^\circ\text{C}$). Через 24 години температура бетону становила 29,1°C ($\Delta t = 13,4^\circ\text{C}$), а потім поступово знижувалася.

Міцність при стиску бетону зразків ($\rho = 450 \text{ кг/м}^3$, $V/\rho = 0,55$), тверднення яких відбувалося в теплоізоляційній камері, була більшою, ніж міцність при стиску бетону зразків, котрі тверділи в повітряних умовах:

– після їх розпалублення в середньому в 1,49 разу (на 32,9%, якщо за 100% прийнято міцність при стиску бетону зразків, котрі тверділи в теплоізоляційній камері);

– у віці 3 діб – в 1,17 разу.

У віці 7, 14 та 28 діб різниця між указаними показниками відсутня.

На рис. 5.37 показано зміну температури важкого бетону, прискорення тверднення якого відбувалося в теплоізоляційній камері впродовж 46 годин. Склад бетону: 1:0,68:2,66; $\rho = 450 \text{ кг/м}^3$; $\Pi = 304,2 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{\text{п}} = 1195,0 \text{ кг/м}^3$; $V = 292,5 \text{ л/м}^3$; $V/\rho = 0,65$; перерахунок вмісту піску (обумовлений зміною V/ρ) здійснювався відносно складу бетону з $V/\rho = 0,45$.

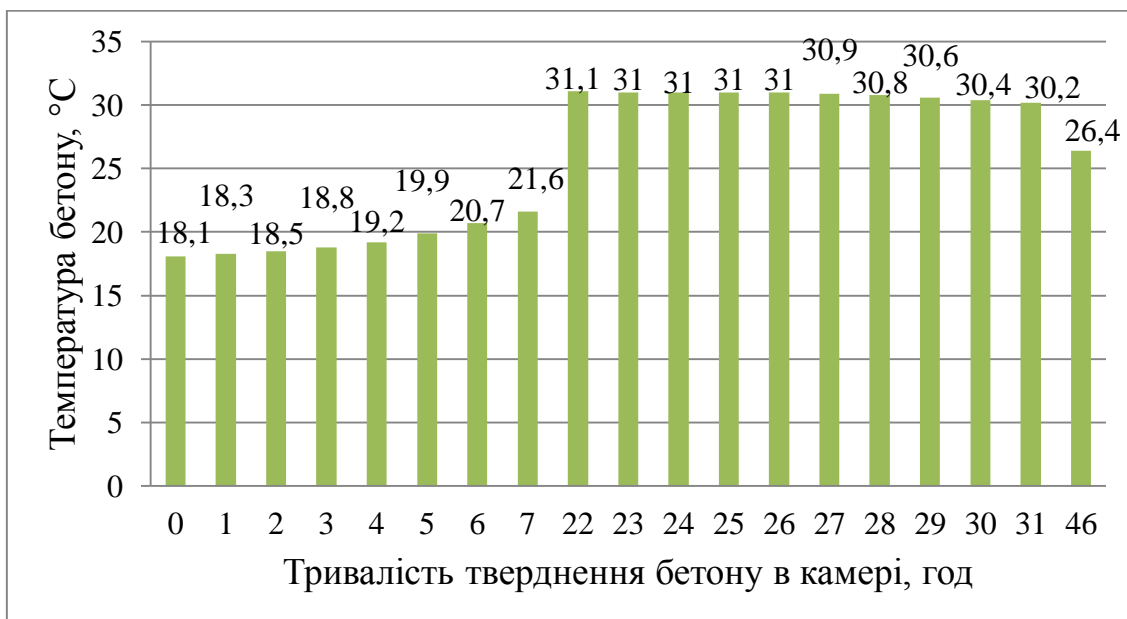


Рис. 5.37. Зміна температури важкого бетону ($\rho = 450 \text{ кг/м}^3$, $V/\rho = 0,65$)

Упродовж 7 годин температура бетону підвищилася з 18,1 до 21,6°C ($\Delta t = 3,5^\circ\text{C}$), а через 22 години температура бетону становила 31,1°C ($\Delta t = 13^\circ\text{C}$). З 23 до 26 години температура бетону не змінювалась і дорівнювала 31,0°C, а потім поступово знижувалась.

На рис. 5.38 відображено зміну температури важкого бетону, прискорення тверднення якого відбувалося в теплоізоляційній камері впродовж 46 годин ($\rho = 450 \text{ кг/м}^3$, $V/\rho = 0,65$). Температура бетону впродовж 15 годин змінилася з 19,0 до 31,6°C ($\Delta t = 12,6^\circ\text{C}$), а через 21 годину становила 33,1°C ($\Delta t = 14,1^\circ\text{C}$). Температура бетону 33,1°C трималася й упродовж 22 години тверднення, а надалі почала поступово знижуватися та через 46 годин дорівнювала 27,5°C.

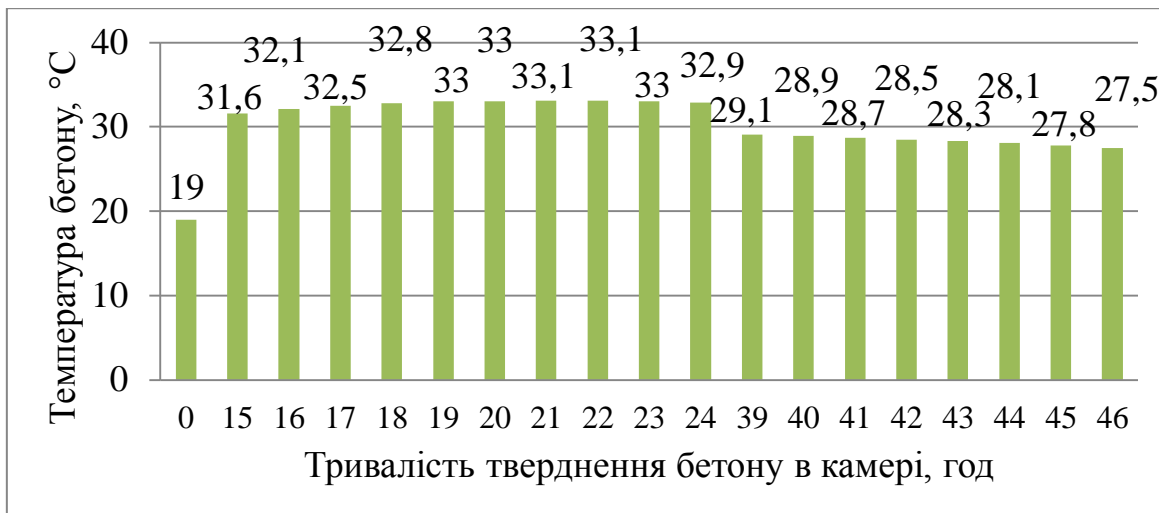


Рис. 5.38. Зміна температури важкого бетону ($\rho = 450 \text{ кг/м}^3$, $V/\rho = 0,65$)

Міцність при стиску бетону зразків ($\rho = 450 \text{ кг/м}^3$, $V/\rho = 0,65$), тверднення яких відбувалося в теплоізоляційній камері, була більшою, ніж міцність при стиску бетону зразків, котрі тверділи в повітряних умовах:

- після їх розпалублення в середньому в 1,53 разу (на 34,5%, якщо за 100% прийнято міцність при стиску бетону зразків, котрі тверділи в теплоізоляційній камері);

- у віці 3 діб – в 1,18 разу.

У віці 7, 14 та 28 діб різниця між указаними показниками відсутня.

На рис. 5.39 відображено значення питомих тепловиділень цементу для перших 6 годин тверднення важкого бетону ($\rho = 450 \text{ кг/м}^3$, $V/\rho = 0,45$). Зміну температури цього бетону під час твердіння в теплоізоляційній камері показано на рис. 5.35.

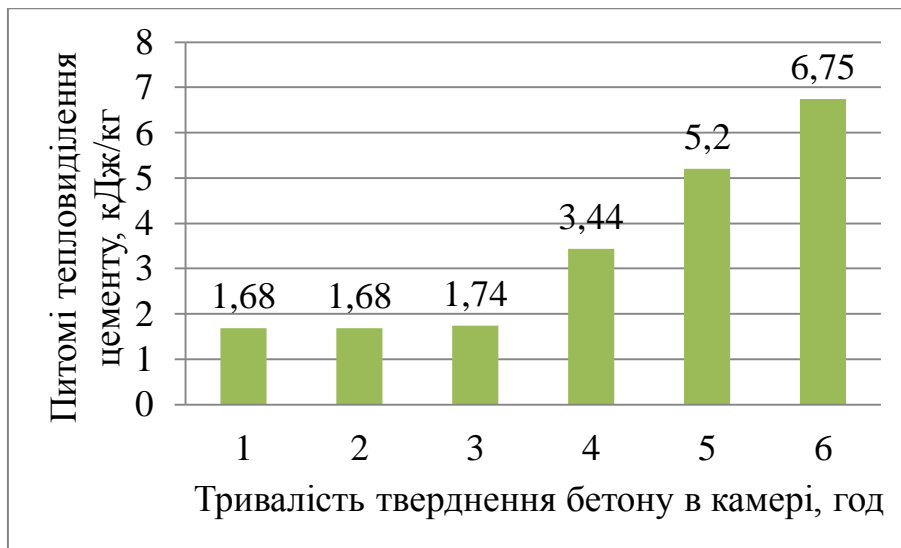


Рис. 5.39. Питомі тепловиділення цементу під час гідратації, кДж/кг ($\rho = 450 \text{ кг/м}^3$, $V/\rho = 0,45$)

На рис. 5.40 зображено сумарні питомі тепловиділення цементу для перших 6 годин тверднення важкого бетону ($\rho = 450 \text{ кг/м}^3$, $V/\rho = 0,45$).

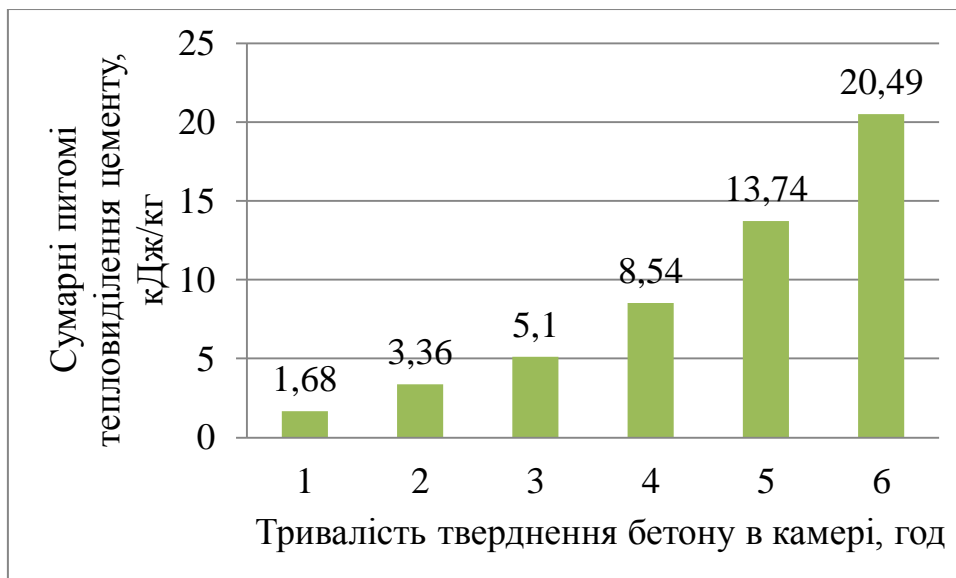


Рис. 5.40. Сумарні питомі тепловиділення цементу під час гідратації, кДж/кг ($\rho = 450 \text{ кг/м}^3$, $V/\rho = 0,45$)

На рис. 5.41 наведено значення питомих тепловиділень цементу для перших 6 годин тверднення важкого бетону ($\rho = 450 \text{ кг/м}^3$, $V/\rho = 0,55$). Зміну температури цього бетону під час тверднення в теплоізоляційній камері показано на рис. 5.36.



Рис. 5.41. Питомі тепловиділення цементу під час гідратації, кДж/кг ($\rho = 450 \text{ кг/м}^3$, $V/\rho = 0,55$)

На рис. 5.42 зображено сумарні питомі тепловиділення цементу для перших 6 годин тверднення важкого бетону ($\rho = 450 \text{ кг/м}^3$, $V/\rho = 0,55$).

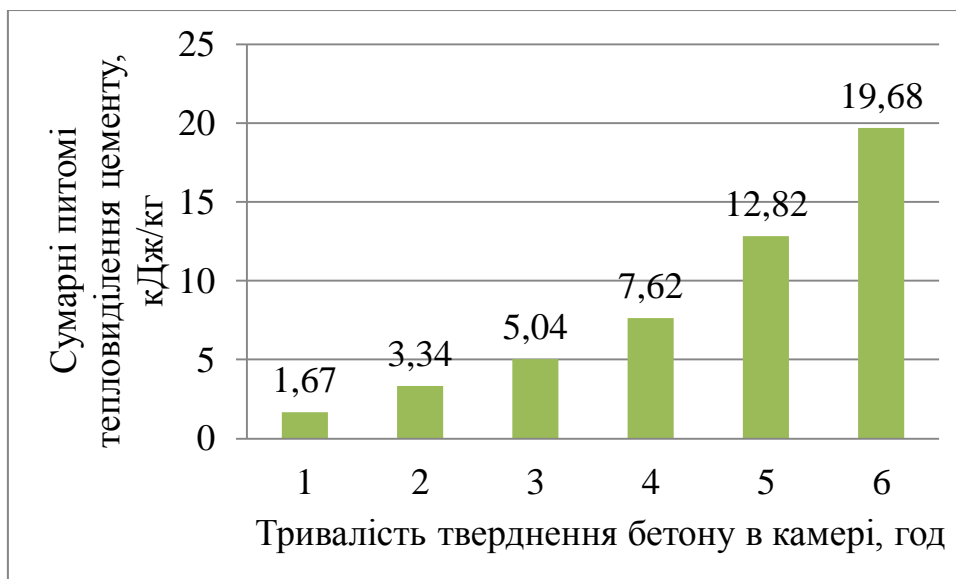


Рис. 5.42. Сумарні питомі тепловиділення цементу під час гідратації, кДж/кг ($\rho = 450 \text{ кг/м}^3$, $V/\rho = 0,55$)

На рис. 5.43 показано значення питомих тепловиділень цементу для перших 7 годин тверднення важкого бетону ($\rho = 450 \text{ кг/м}^3$, $V/\rho = 0,65$). Зміну температури цього бетону під час тверднення в теплоізоляційній камері відображено на рис. 5.37.

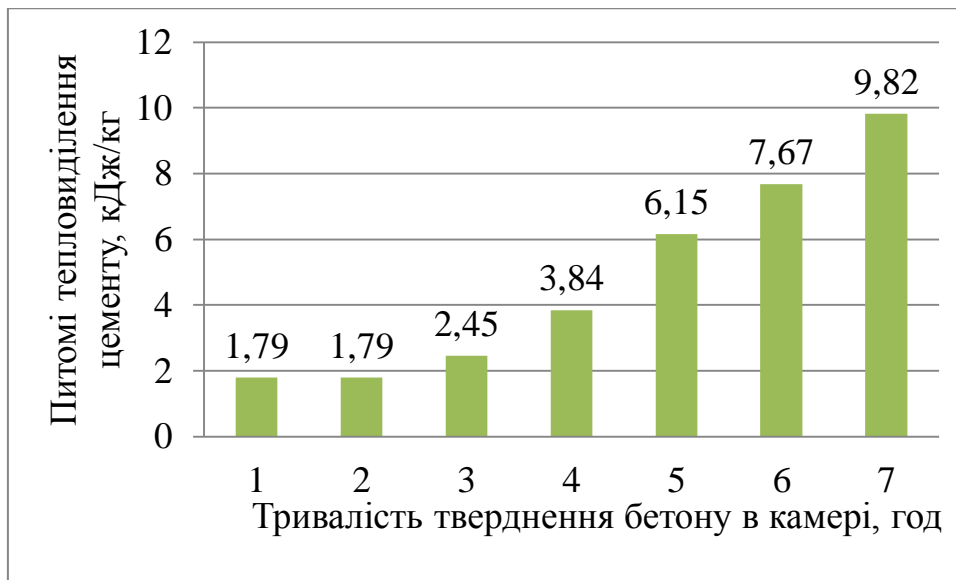


Рис. 5.43. Питомі тепловиділення цементу при гідратації впродовж перших 7 год тверднення важкого бетону, кДж/кг (Ц = 450 кг/м³, В/Ц = 0,65)

На рис. 5.44 зображено сумарні питомі тепловиділення цементу для перших 7 годин тверднення важкого бетону (Ц = 450 кг/м³, В/Ц = 0,65).

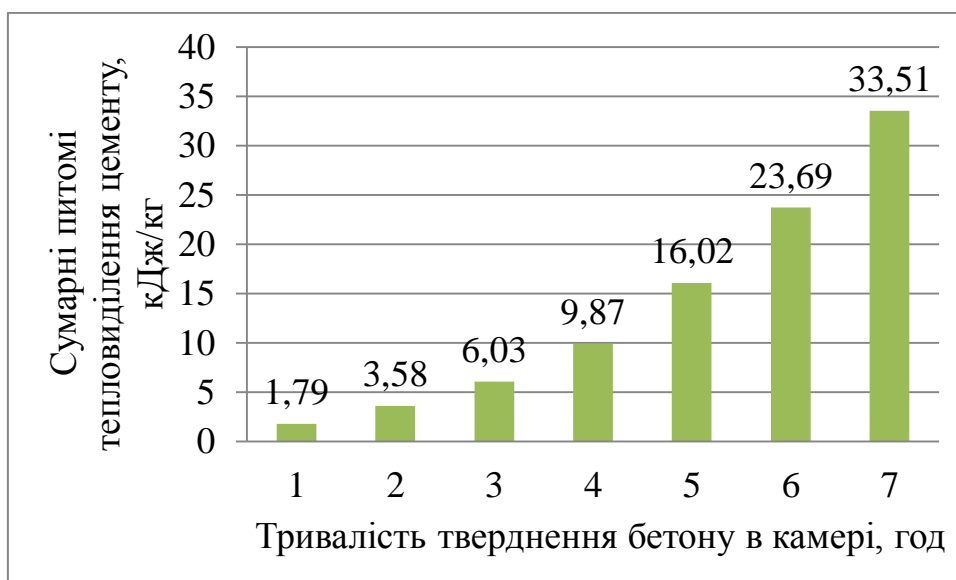


Рис. 5.44. Сумарні питомі тепловиділення цементу при гідратації впродовж перших 7 год тверднення важкого бетону, кДж/кг (Ц = 450 кг/м³, В/Ц = 0,65)

Сумарні питомі тепловиділення цементу при гідратації для 6 години тверднення важкого бетону в теплоізоляційній камері дорівнюють: 20,49 кДж/кг (при В/Ц = 0,45); 19,68 кДж/кг (при В/Ц = 0,55); 23,69 кДж/кг (при В/Ц = 0,65). Сумарні питомі тепловиділення цементу при В/Ц = 0,55 упродовж 6 годин є меншими порівняно з іншими показниками. Пояснюється це нижчою початковою температурою бетонної суміші та інших складових системи, що досліджується.

Приклад 5.6. Мета досліджень: визначення залежності питомого тепловиділення цементу при гідратації впродовж доби Q_E , кДж/кг, від вмісту цементу й показника В/Ц у межах варіювання для вибраних умов.

Дослідження здійснено в лабораторній камері з використанням зразків – кубів із важкого бетону (15×15×15 см). Для проведення цих експериментів було використано цемент ПЦ I-500-Н (ДСТУ Б В.2.7-46:2010). У складі бетону – суперпластифікатор на основі лігносульфонатів; вміст цієї добавки відповідає рекомендаціям виробника. Середня початкова температура тверднучих бетонних виробів дорівнює 19,8°C.

Планування досліджень та їх математично-статистична обробка здійснювалися з використанням рекомендацій джерела [238].

У таблиці 5.6 показано значення інтервалів варіювання вмісту цементу та В/Ц.

Таблиця 5.6

Значення інтервалів варіювання

Код	Значення коду	Значення факторів	
		x_1 (вміст цементу в бетоні Ц, кг/м ³)	x_2 (В/Ц)
Основний рівень	0	400	0,55
Інтервал варіювання	x_1	50	0,1
Верхній рівень	+	450	0,65
Нижній рівень	–	350	0,45

Для планів другого порядку при двофакторних експериментах рівняння, яке відображає залежність питомого тепловиділення цементу при гідратації упродовж однієї доби від вихідних факторів, має загальний вигляд

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2.$$

$$b_0 = 0,2632 \sum_{u=1}^N y_u - 0,1579 \left(\sum_{u=1}^N x_1^2 y_u + \sum_{u=1}^N x_2^2 y_u \right),$$

де y_u – значення досліджуваної властивості бетону в u – тому досліді.

Для планів другого порядку при двофакторних експериментах (що мають три рівні) коефіцієнти рівняння регресії обчислюються за формулами:

$$b_1 = 0,1667 \sum_{u=1}^N x_1 y_u;$$

$$b_2 = 0,1667 \sum_{u=1}^N x_2 y_u;$$

$$b_{11} = -0,1579 \sum_{u=1}^N y_u + 0,5 \sum_{u=1}^N x_1^2 y_u - 0,1053 \left(\sum_{u=1}^N x_1^2 y_u + \sum_{u=1}^N x_2^2 y_u \right);$$

$$b_{22} = -0,1579 \sum_{u=1}^N y_u + 0,5 \sum_{u=1}^N x_2^2 y_u - 0,1053 \left(\sum_{u=1}^N x_1^2 y_u + \sum_{u=1}^N x_2^2 y_u \right);$$

$$b_{12} = 0,25 \sum_{u=1}^N x_1 x_2 y_u.$$

$$\bar{y}_0 = \left(\sum_{u=1}^{n_0} y_{0u} \right) / n_0.$$

Отримано рівняння

$$y = 118,23 + 5,1177x_1 + 14,836x_2 - 0,621x_1^2 + 4,029x_2^2 + 1,325 x_1x_2.$$

Дисперсія в нульовій точці

$$S_y^2 = S_{\bar{y}}^2 - S_0^2 = \sum_{u=1}^{n_0} (\bar{y}_0 - y_{0u})^2 / (n_0 - 1).$$

$$S_y^2 = S_{\bar{y}}^2 - S_0^2 = 0,303333.$$

Середнє квадратичне відхилення, яке характеризує похибку досліду,

$$S_y = \sqrt{S_y^2} = \sqrt{\sum_{u=1}^{n_0} (\bar{y}_0 - y_{0u})^2 / (n_0 - 1)}.$$

Середні квадратичні похибки при визначенні коефіцієнтів:

$$- b_0: S_{b_0}^2 = 0,2632S_{\bar{y}}^2; S_{b_0} = \sqrt{S_{b_0}^2} = 0,513S_{\bar{y}};$$

$$- b_i(b_1, b_2): S_{b_i}^2 = 0,1667S_{\bar{y}}^2; S_{b_i} = 0,4083S_{\bar{y}};$$

$$- b_{ii}(b_{11}, b_{22}): S_{b_{ii}}^2 = 0,3947S_{\bar{y}}^2; S_{b_{ii}} = 0,6282S_{\bar{y}};$$

$$- b_{12}: S_{b_{12}}^2 = 0,25 S_{\bar{y}}^2; S_{b_{12}} = 0,5S_{\bar{y}}.$$

$$S_{b_0} = 0,282538; S_{b_i} = 0,224874; S_{b_{ii}} = 0,345986; S_{b_{12}} = 0,275379.$$

Розрахункове значення t_p – критерію Стьюдента

$$t_p = \frac{|b_i|}{S_{b_i}}.$$

Для значимих коефіцієнтів $t_r < t_p$.

При виборі табличного значення t_r – критерію Стьюдента використовується кількість степенів вільності:

$$f_{\bar{y}} = n_0 - 1;$$

$$f_{\bar{y}} = 3 - 1 = 2;$$

$$t_T = 4,3.$$

Значимими в рівнянні регресії є коефіцієнти:

118,23 (418,4642 > 4,3); 5,1177 (22,75802 > 4,3); 14,836 (65,97603 > 4,3);

4,029(11,64491 > 4,3); 1,325 (4,811559 > 4,3).

Коефіцієнт $t_T = -0,621$ у рівнянні регресії – незначимий (1,794959 < 4,3).

Уточнене рівняння регресії має вигляд

$$y = 118,23 + 5,1177x_1 + 14,836x_2 + 4,029x_2^2 + 1,325 x_1x_2.$$

Дисперсія адекватності обчислюється за формулою

$$S_{ад}^2 = \sum_{u=1}^N (y_u - y_{ур})^2 / (N - m - (n_0 - 1)),$$

де N – кількість експериментів;

m – кількість значимих коефіцієнтів у рівнянні регресії;

n_0 – кількість експериментів на нульовому рівні.

$$S_{ад}^2 = 0,853571.$$

Значення критерію Фішера F обчислено при кількості степенів вільності:

$$f_{ад} = N - m - (n_0 - 1);$$

$$f_{ад} = 11 - 5 - (3-1) = 4;$$

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2};$$

$$F_p = \frac{0,853571}{0,303333} = 2,814 < 19,3.$$

Рівняння регресії пригода тне для використання.

У таблиці 5.7 відображено планування досліджень та отримані результати.

Таблиця 5.7

Планування досліджень та результати досліджень і обчислень

Точка плану	План експерименту		U_u , (Q_E , кДж/кг)	U_p , (Q_E , кДж/кг)	U_p' , (Q_E , кДж/кг)
	x_1	x_2			
1	+1	+1	143,0	142,91912	143,54015
2	+1	-1	110,9	110,59652	111,21755
3	-1	+1	129,7	130,03374	130,65477
4	-1	-1	102,9	103,01114	103,63217
5	+1	0	122,5	122,72885	123,34988
6	-1	0	113,1	112,49347	113,1145
7	0	+1	137,5	137,09746	137,09746
8	0	-1	107,4	107,42486	107,42486
9	0	0	118,6	118,23219	118,23219
10	0	0	118,1	118,23219	118,23219
11	0	0	117,5	118,23219	118,23219

На рис. 5.45 показано значення питомого тепловиділення цементу при гідратації за добу залежно від фактора x_1 (вміст цементу в бетоні Ц, кг/м³) та фактора x_2 (В/Ц) на максимальному рівні; на рис. 5.46 – на основному рівні; на рис. 5.47 – на мінімальному рівні.

Побудова діаграми (рис. 5.45) здійснювалася за такими загальними залежностями:

$$- x_1: y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} + b_{12} x_1;$$

$$- x_2: y = b_0 + b_1 + b_2 x_2 + b_{11} + b_{22} x_2^2 + b_{12} x_2.$$

У цьому випадку на інтенсивність тепловиділення цементу при гідратації за добу більший вплив має вміст цементу в бетоні (порівняно з впливом В/Ц).

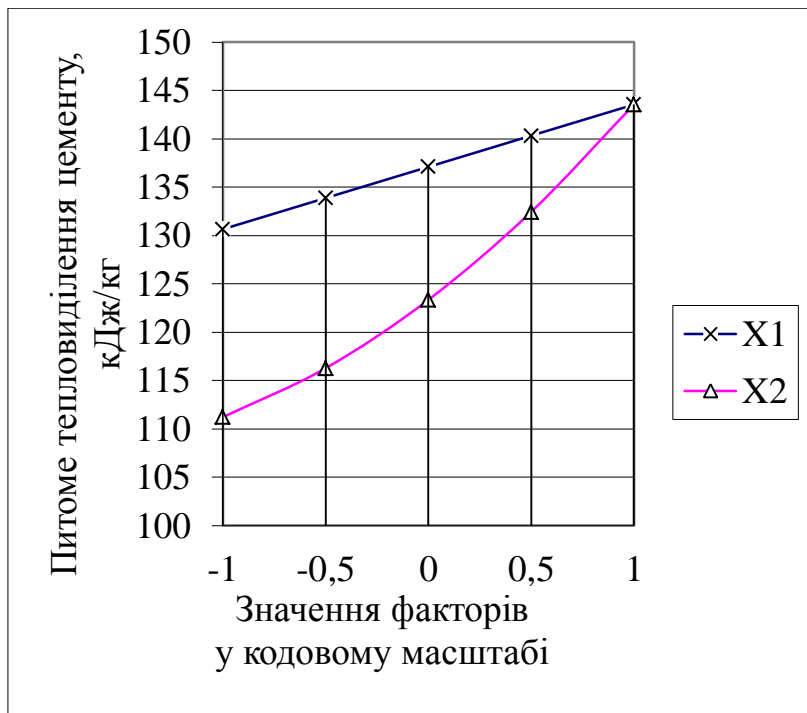


Рис. 5.45. Питоме тепловиділення цементу при гідратації за добу залежно від вмісту цементу в бетоні Ц, кг/м³ (фактор x₁), та В/Ц (фактор x₂) на максимальному рівні

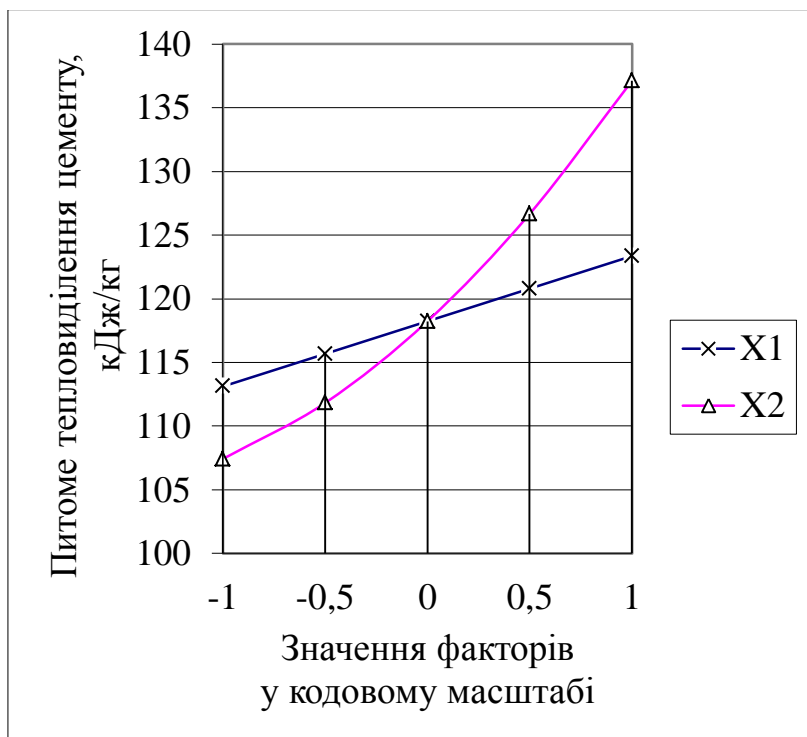


Рис. 5.46. Питоме тепловиділення цементу при гідратації за добу залежно від вмісту цементу в бетоні Ц, кг/м³ (фактор x₁), та В/Ц (фактор x₂) на основному рівні

Побудова діаграми (рис. 5.46) здійснювалася за такими загальними залежностями:

$$- x_1: y = b_0 + b_1 x_1 + b_{11} x_1^2;$$

$$- x_2: y = b_0 + b_2 x_2 + b_{22} x_2^2.$$

У цьому випадку на інтенсивність тепловиділення цементу при гідратації за добу в межах факторів у кодовому масштабі $[-1 \dots 0[$ переважає вплив умісту цементу, в межах факторів у кодовому масштабі $]0 \dots 1]$ – вплив В/Ц.

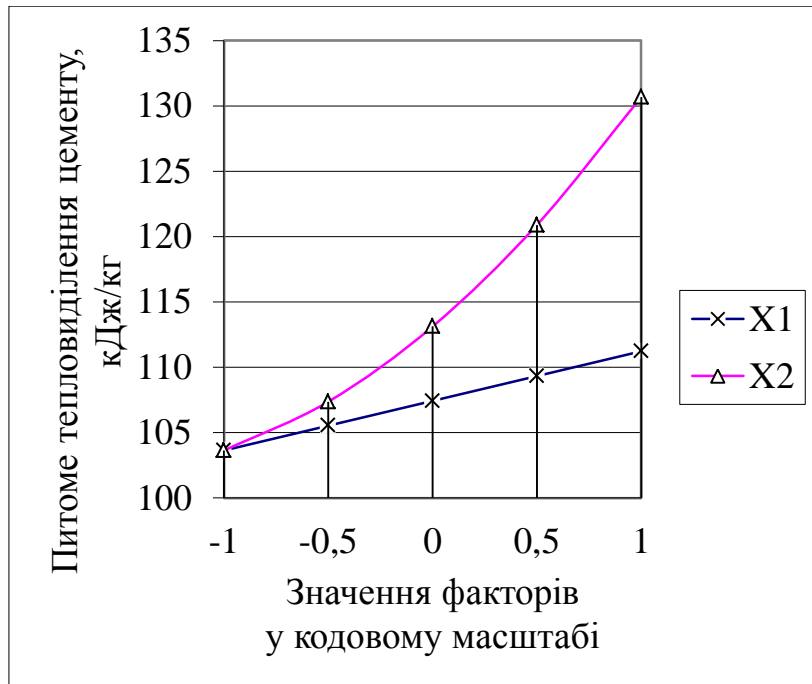


Рис. 5.47. Питоме тепловиділення цементу при гідратації за добу залежно від вмісту цементу в бетоні Ц, кг/м^3 (фактор x_1), та В/Ц (фактор x_2) на мінімальному рівні

Побудова діаграми (рис. 5.47) здійснювалася за такими загальними залежностями:

$$- x_1: y = b_0 + b_1 x_1 - b_2 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} - b_{12} x_1 x_2;$$

$$- x_2: y = b_0 - b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{11} + b_{22} x_2^2 - b_{12} x_1 x_2.$$

У цьому випадку на інтенсивність тепловиділення цементу при гідратації за добу більший вплив має В/Ц (ніж вміст цементу в бетоні).

Слід підкреслити, що міцність бетону при стиску обернено пропорційна значенню В/Ц (у певних межах), а собівартість бетонних та залізобетонних виробів зростає при збільшенні вмісту цементу.

Приклад 5.7. Мета досліджень:

- здійснити теплову обробку бетонних тротуарних плиток у лабораторній камері з використанням теплоти гідратації цементу згідно з положеннями основного етапу досліджень; термін теплової обробки цих виробів – одна доба;
- порівняти у визначені терміни (1, 3, 7 та 28 діб) руйнівним методом міцність при стиску бетону тротуарних плиток, котрі тверділи в тепловій камері та в повітряних умовах;
- виконати перевірку математичної моделі теплової обробки бетонних тротуарних плиток із використанням теплоти гідратації цементу (див. підрозділ 5.5).

Розміри плиток – 20×10×4 см. Склад бетону: 1:1,33:2,41; Ц = 485,9 кг/м³; П = 644,0 кг/м³; Щ = 1171,9 кг/м³; В/Ц = 0,30; використано портландцемент ПЦ I-500-Н (ДСТУ Б В.2.7-46:2010); хімічні добавки: суперпластифікатор на основі полікарбоксилату; прискорювач тверднення цементу на основі тіосульфата і роданіда натрію; вміст добавок – згідно з рекомендаціями виробника.

На рис. 5.48 наведено приклад зміни температури бетонних тротуарних плиток у теплоізоляційній камері впродовж однієї доби.

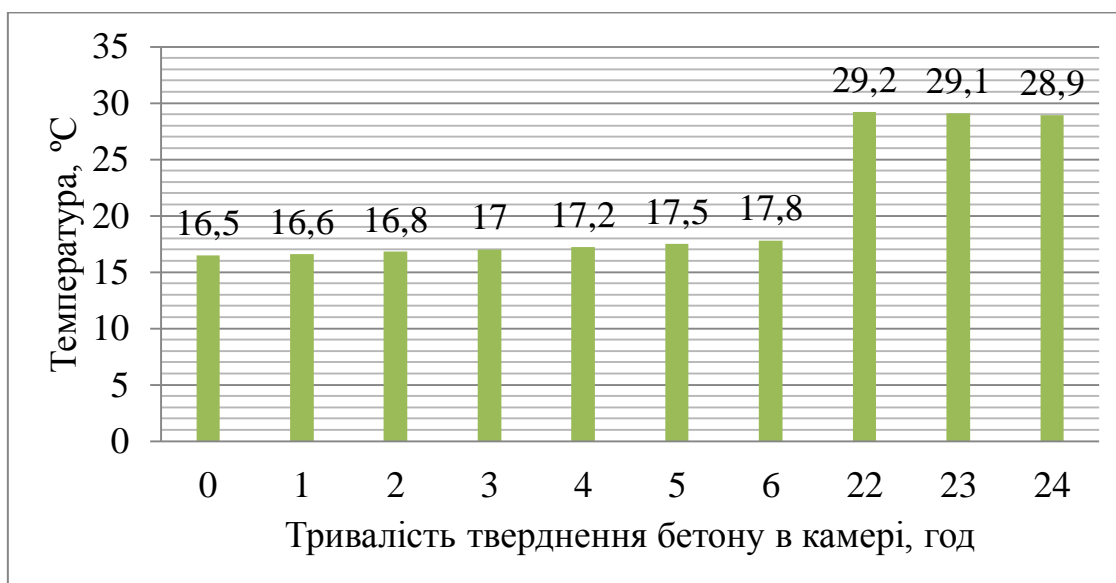


Рис. 5.48. Зміна температури бетонних тротуарних плиток (приклад 5.7)

За перші 6 годин тверднення температура бетону зросла на 1,3°C, а через 22 години перевищувала початкову температуру на 12,7 °C. Маса форм становить близько 7% від маси плитки, тому витрата теплоти на нагрівання форм – мінімально можлива.

На рис. 5.49 показано порівняння міцності при стиску бетону тротуарних плиток, які першу добу тверділи в лабораторній камері (надалі плитки тверділи в повітряних умовах), та міцності при стиску бетону тротуарних плиток, котрі тверділи в умовах лабораторії.

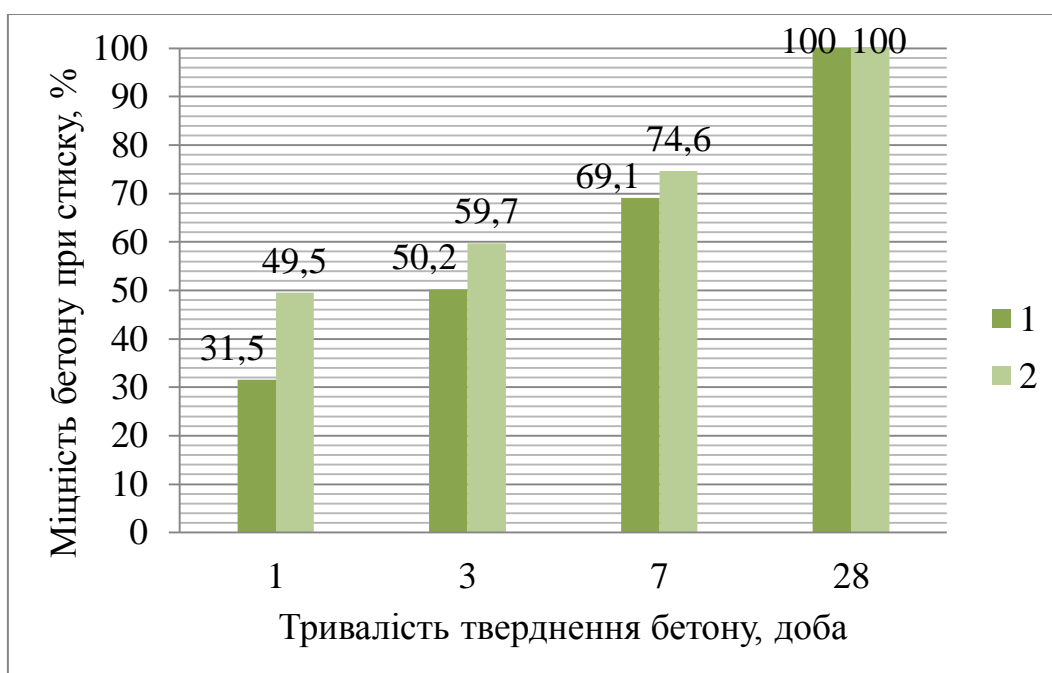


Рис. 5.49. Міцність при стиску бетону тротуарних плиток (приклад 5.7):

1 – тверднення бетонних плиток в повітряних умовах

2 – перша доба: тверднення бетонних плиток у тепловій камері
(надалі плитки тверділи в повітряних умовах)

Міцність при стиску бетону тротуарних плиток через добу їх тверднення в теплоізоляційній камері в 1,57 разу перевищувала міцність при стиску бетону тротуарних плиток, тверднення яких відбувалося в повітряних умовах, у віці 3 діб – в 1,19 разу, у віці 7 діб – в 1,08 разу.

Підсумки:

1. Опрацьовано метод визначення тепловиділення цементу при гідратації (приклади 5.5, 5.6).

З'ясовано, що частка теплоти, котра витрачалася на нагрівання конструкцій, що огорожують теплоізоляційну камеру, впродовж перших годин тверднення є незначною. Наприклад, ця величина впродовж перших 7 годин тверднення бетону ($\rho = 450 \text{ кг/м}^3$, $V/\rho = 0,65$) та 6 годин тверднення бетону ($\rho = 450 \text{ кг/м}^3$, $V/\rho = 0,45$) не перевищувала 4,2%, а в середньому становила 1,93% (приклад 5.5). Але внаслідок прогрівання конструкцій теплоізоляційної камери температура їх зовнішніх поверхонь з певного моменту часу стає вищою, ніж температура повітря приміщення. Сумарна частка витрат теплоти на нагрівання теплоізоляційної камери і втрат теплоти в навколишнє середовище є суттєвою. Наприклад, упродовж 16 години тверднення бетонних зразків ця частка становила в середньому 15,7%.

Таким чином, контролювання ступеня прогрівання теплоізоляційної камери та втрат теплоти крізь її конструкції є необхідним чинником у дослідженні тепловиділення цементу.

2. Установлено (за допомогою критерію Фішера) адекватність рівняння регресії, яке характеризує вплив на інтенсивність тепловиділення цементу при гідратації (впродовж першої доби тверднення бетону в досліджуваних умовах) вмісту цементу та показника V/ρ у межах варіювання (приклад 5.6).

3. Установлено, що міцність при стиску бетону зразків, тверднення яких відбувалося впродовж 2 діб у лабораторній камері (надалі ці зразки тверділи в повітряних умовах), була більшою, ніж міцність при стиску бетону зразків, котрі тверділи в повітряних умовах (приклад 5.5):

- після їх розпалублення приблизно в 1,5 разу;
- у віці 3 діб – приблизно в 1,2 разу.

У віці 7, 14 та 28 діб різниця між указаними показниками відсутня.

4. Тверднення зразків із важкого бетону в лабораторній тепловій камері відбувалося впродовж 46 – 48 год (приклад 5.5).

З'ясовано, що наприкінці другої доби тверднення бетонних зразків у тепловій камері їх температура перевищувала температуру повітря лабораторії, що є сприятливим фактором для подовження терміну тверднення зразків у камері.

Але в умовах виробництва тверднення бетонних чи залізобетонних виробів у тепловій камері впродовж двох (і більше) діб не відбувається. Тому в подальших дослідженнях термін перебування зразків у лабораторній камері становив одну добу.

5. Установлено, що міцність при стиску бетону тротуарних плиток через добу їх тверднення в теплоізоляційній камері (із використанням теплоти гідратації цементу) в 1,57 разу перевищувала міцність при стиску бетону контрольних тротуарних плиток (надалі ці плитки тверділи в повітряних умовах), у віці 3 діб – в 1,19 разу, у віці 7 діб – в 1,08 разу. Через 28 діб різниця між указаними показниками відсутня (приклад 5.7).

5.5. Експериментальна перевірка математичних моделей

У лабораторній камері здійснювалася експериментальна перевірка математичної моделі процесу теплової обробки бетонних зразків (10×10×10 см) з використанням нагрітого в колекторі сонячної енергії повітря.

Кількість повітря, що циркулює в установці, дорівнювала $L = 176 \text{ м}^3/\text{год}$. Вимірювання температури складових системи відбувалося через $\Delta t = 15 \text{ хв}$.

Порівняння експериментально визначеної та обчисленої температури бетонних зразків упродовж терміну їх теплової обробки нагрітим повітрям наведено на рис. 5.50.

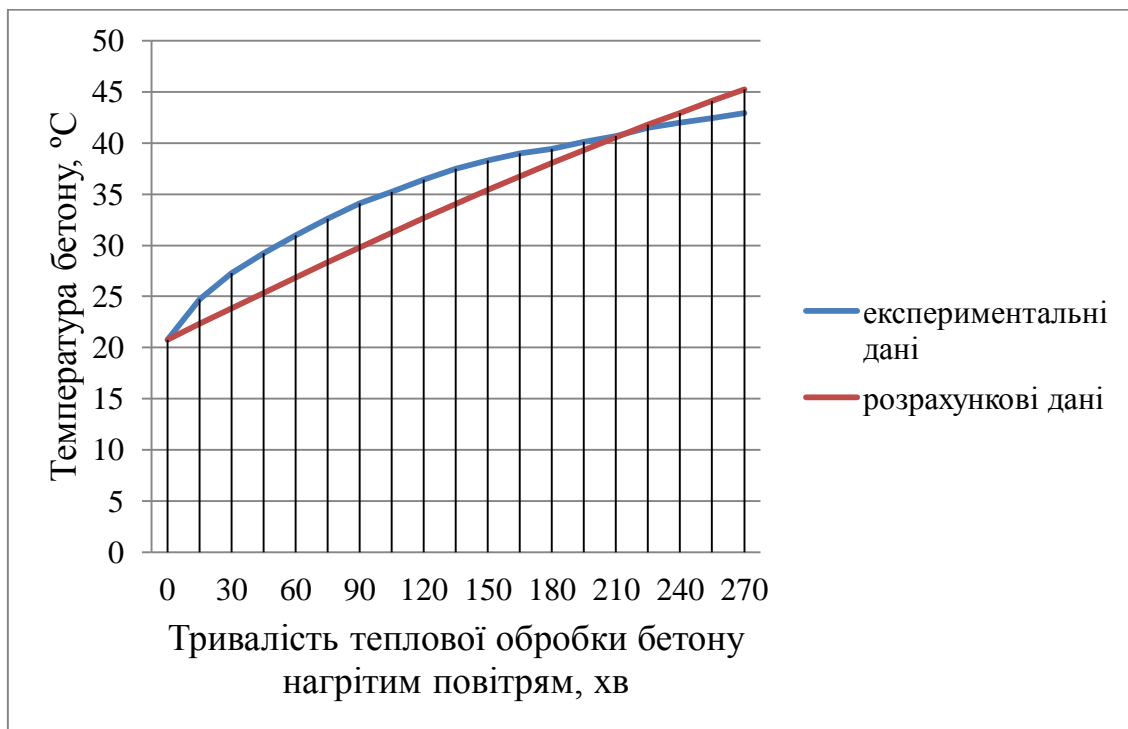


Рис. 5.50. Порівняння експериментальних та розрахункових значень температури бетону

Різницю у відсотках між експериментальними та розрахунковими значеннями температури бетону в період їх нагрівання повітрям наведено на рис. 5.51.



Рис. 5.51. Різниця між експериментальними

та розрахунковими значеннями температури бетону

Через 24 години температура бетону в камері:

- визначена експериментально, дорівнювала $26,1^{\circ}\text{C}$;
- визначена розрахунком, дорівнювала $24,2^{\circ}\text{C}$.

Різниця між експериментальними та розрахунковими значеннями температури бетонних тротуарних плиток через 24 год становила $1,9^{\circ}\text{C}$ (7,3% відносно експериментально визначеної температури).

Здійснювалася експериментальна перевірка математичної моделі процесу теплової обробки бетонних тротуарних плиток ($20 \times 10 \times 4$ см) із використанням теплоти гідратації цементу (див. приклад 5.7).

Порівняння експериментально визначеної та обчисленої інтенсивності нагрівання бетонних тротуарних плиток упродовж перших 7 годин наведено на рис. 5.52.

Через 24 години температура бетону в камері:

- визначена експериментально, дорівнювала $28,9^{\circ}\text{C}$;
- визначена розрахунком, дорівнювала $27,5^{\circ}\text{C}$.

Різниця між експериментальними та розрахунковими значеннями температури бетонних тротуарних плиток через 24 год становила $1,4^{\circ}\text{C}$ (4,8% відносно експериментально визначеної температури).

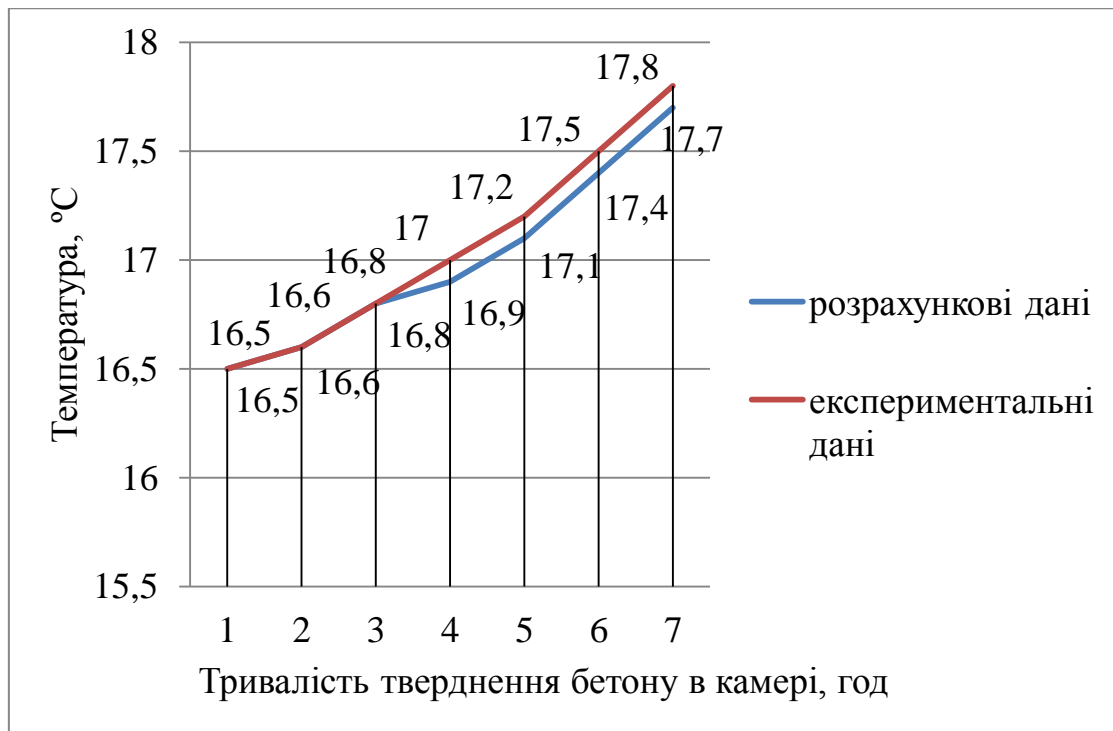


Рис. 5.52. Порівняння експериментальних та розрахункових значень температури бетонної плити впродовж перших 7 годин тверднення

Підсумки:

1. Експериментально перевірено математичну модель процесу теплової обробки бетонних зразків (10×10×10 см) з використанням нагрітого в колекторі сонячної енергії повітря.
2. Експериментально перевірено математичну модель процесу теплової обробки бетонних тротуарних плиток (20×10×4 см) із використанням теплоти гідратації цементу.

5.6. Рекомендації

щодо технології теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії

Рекомендації щодо технології теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії або в повітронагрівачі

1. Технологія теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії або в повітронагрівачі, передбачає застосування спеціального обладнання для теплопостачання камери.

1.1. Теплопостачання камери здійснюється за схемою, відображеною на рис. 2.1 (відповідні пояснення до схеми наведено в підрозділі 2.1).

1.2. Конструкції, що огороджують теплову камеру, повинні забезпечувати мінімальні втрати теплоти камерою в навколишнє середовище.

Вибір цих конструкцій здійснюється за техніко-економічним обґрунтуванням. Відповідні обчислення виконуються з урахуванням положень, наведених у розділі 3.

Над днищем камери розташовується теплоізоляційний шар. У цьому шарі створюються отвори, призначені для розміщення в них опор для форм з виробами (або спеціальних полиць, на яких розміщуються форми з виробами).

1.3. Вироби розташовуються один над одним на конструктивних опорах.

Висота цих опор обумовлює сумісно з іншими факторами швидкість руху повітря в просторі між формами.

Вироби можуть бути розмішені на спеціальних полицях, якщо їх маса порівняно невелика.

1.4. Вироби під час їх теплової обробки повинні бути закриті (для попередження випаровуванню з них вологи).

Для цього використовуються спеціальні кришки. Допускається гідроізоляція виробів за допомогою поліетиленової плівки.

1.5. Подача нагрітого повітря в теплову камеру здійснюється з кількох отворів в стінці камери. Відпрацьоване повітря відводиться з теплової камери через отвори, розташовані в протилежній стінці.

За обґрунтуванням у тепловій камері розміщуються повітропроводи, призначені для розподілу та відведення повітря.

1.6. Під час надходження нагрітого повітря до теплової камери здійснюється контроль температури бетонних виробів і температури повітря (на вході до камери та на виході з камери).

1.7. В установці використовується плоский колектор сонячної енергії власної конструкції.

У додатку К показано можливі варіанти конструкції колектора.

Конструктивні розміри колектора сонячної енергії визначаються на основі відповідних розрахунків (див. розділ 3) й експериментальних досліджень (див. розділ 5).

1.8. Вибір електричного повітрянагрівача (або повітрянагрівачів) здійснюється за техніко-економічним обґрунтуванням. Відповідні обчислення виконуються з урахуванням положень, наведених у розділі 3.

2. Теплова обробка бетонних та залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії, або в повітрянагрівачі, здійснюється у дві стадії:

– під час першої стадії в теплову камеру подається нагріте повітря;

– під час другої стадії відбувається термосне твердіння цих виробів у тепловій камері.

Тривалість указаних стадій теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії або в повітрянагрівачі, визначається на основі експериментальних досліджень.

Рекомендації щодо технології теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії, або з використанням тільки теплоти гідратації цементу

1. Технологія теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії, або з використанням тільки теплоти гідратації цементу передбачає застосування спеціального обладнання для теплопостачання камери.

1.1. Теплопостачання камери здійснюється за схемою, відображеною на рис. 2.2 (відповідні пояснення до схеми наведено в підрозділі 2.1).

П. 1.2 – 1.7 аналогічні до відповідних пунктів наведених вище рекомендацій.

2. Теплова обробка бетонних і залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії, здійснюється у дві стадії:

– під час першої стадії в теплову камеру подається нагріте в колекторі сонячної енергії повітря;

– під час другої стадії відбувається термосне тверднення цих виробів у тепловій камері.

Тривалість указаних стадій теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії, визначається на основі експериментальних досліджень.

За відсутності надходження сонячної енергії до колектора (або при неінтенсивному нагріванні повітря в колекторі) прискорення твердіння бетонних та залізобетонних виробів здійснюється з використанням тільки теплоти гідратації цементу.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 5

1. Опрацьовано методику експериментально-розрахункових досліджень процесів теплової обробки в закритих формах бетонних виробів із використанням нагрітого повітря та теплоти гідратації цементу.

2. Установлено, що тепла обробка бетонних зразків і тротуарних плиток із використанням:

– нагрітого повітря та теплоти гідратації цементу;

– теплоти гідратації цементу

надає можливість інтенсифікувати на ранніх стадіях процес їх тверднення (порівняно з твердненням у повітряних умовах).

Різниця між міцністю при стиску бетону зразків і виробів, тепла обробка котрих здійснювалася одним із указаних вище способів, та міцністю при стиску бетону зразків і виробів, тверднення яких відбувалося в повітряних умовах, після їх розпалублення була максимальною. Надалі ця різниця поступово зменшувалася, і через 28 діб або була відсутня, або була незначною.

Наприклад, міцність при стиску бетону тротуарних плиток досліджуваного складу через добу їх тверднення в лабораторній камері:

– із використанням теплоти гідратації цементу в 1,57 разу перевищувала міцність при стиску бетону контрольних тротуарних плиток, у віці 3 діб – в 1,19 разу, у віці 7 діб – в 1,08 разу; через 28 діб різниця між указаними показниками відсутня;

– із використанням нагрітого повітря (за 4,5 год температура бетонних плиток підвищилася від 16,5 до 38,1°C) в 2,04 разу перевищувала міцність при стиску бетону контрольних тротуарних плиток, у віці 3 діб – в 1,47 разу, у віці 7 діб – в 1,19 разу, у віці 28 діб – в 1,06 разу.

Якщо впродовж терміну теплової обробки бетонних або залізобетонних виробів із використанням низькопотенціальних джерел теплоти не відбувається набір бетоном виробів необхідної відпускну міцності, то прискорення

тверднення цих виробів (за наявності відповідних виробничих умов) здійснюється у дві стадії:

- під час першої стадії в тепловій камері відбувається набір бетоном виробів міцності, яка дорівнює розпалубній міцності або перевищує її;

- під час другої стадії в повітряних умовах відбувається набір бетоном виробів відпускнуї міцності.

Досліджувані способи теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів із використанням низькопотенціальних джерел теплоти надають можливість:

- збільшити оборотність форм порівняно з повітряними умовами тверднення цих виробів;

- заощаджувати енергоресурси під час прискорення тверднення цих виробів.

3. Опрацьовано метод визначення тепловиділення цементу при гідратації, який є складовою частиною методики експериментально-розрахункових досліджень процесів теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу.

Установлено (за допомогою критерію Фішера) адекватність рівняння регресії, яке характеризує вплив на інтенсивність тепловиділення цементу при гідратації (впродовж першої доби тверднення бетону в досліджуваних умовах) вмісту цементу та показника В/Ц у межах варіювання.

4. Опрацьовано методику експериментально-розрахункових досліджень процесів теплової обробки бетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу.

5. Виконано експериментальні перевірки:

- математичної моделі, котра відображає теплову обробку бетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії, та теплоти гідратації цементу;

- математичної моделі, яка відображає теплову обробку бетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу.

6. Розроблено рекомендації щодо технологій теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії або в повітрянагрівачі, й теплоти гідратації цементу.

7. Рекомендовано теплову обробку бетонних і залізобетонних виробів:

– із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії або в повітрянагрівачі, здійснювати впродовж року;

– із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії, або з використанням тільки теплоти гідратації цементу, здійснювати в літній період року та наприкінці весняного і на початку осіннього періодів року.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Уперше розроблено основи методології теплової обробки в закритих формах бетонних і залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії або в повітронагрівачі, та теплоти гідратації цементу; в межах цієї методології:

– розроблено способи та відповідні технології теплової обробки в закритих формах бетонних і залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії або в повітронагрівачі, й теплоти гідратації цементу;

– створено методику моделювання процесів теплової обробки в закритих формах бетонних і залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії або в повітронагрівачі, та теплоти гідратації цементу; ця методика ґрунтується на:

- розроблених математичних моделях процесів теплообміну в установках для теплової обробки в закритих формах бетонних і залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії або в повітронагрівачі, та теплоти гідратації цементу;
- створеній методиці експериментально-розрахункових досліджень процесів теплової обробки в закритих формах бетонних і залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії або в повітронагрівачі, та теплоти гідратації цементу;
- створеній методиці експериментально-розрахункових досліджень процесів теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу (вироби знаходяться або у відкритих, або в закритих формах).

2. Розроблена методологія теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням низькопотенціальних джерел теплоти надає можливість:

- прогнозувати кінетику набору міцності бетоном виробів (та інші властивості бетону) при тепловій обробці виробів у досліджуваних умовах;
- визначати ефективні склади бетону для досліджуваних способів теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів;
- приймати оптимальні конструктивні рішення відповідних установок (що проектуються) й оптимальні конструктивні рішення реконструкції існуючих установок;
- здійснювати техніко-економічне обґрунтування умов, за яких доцільно використовувати найбільш ефективні способи теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням низькопотенціальних джерел теплоти.

3. Застосування теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії, та теплоти гідратації цементу дозволяє заощаджувати енергію, потрібну для прискорення їх тверднення.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адамцевич А.О. Использование калориметрии для прогнозирования роста прочности цементных систем ускоренного твердения [Электронный ресурс] / А.О. Адамцевич С.А. Пашкевич, А.П. Пустовгар. – Режим доступа: http://engstroy.spb.ru/index_2013_03/adamcevich.pdf.
2. Аксенчик К.В. Моделирование и расчёт тепло- и массообменных процессов в бетоне при тепловлажностной обработке [Электронный ресурс] / К.В. Аксенчик. – Режим доступа: http://euroasiascience.ru/files/arhiv/27-28.03.2015/evro_12_p4.pdf.
3. Александровский С.В. Расчёт бетонных и железобетонных конструкций на температурные и влажностные воздействия (с учётом ползучести) / С.В. Александровский. – М. : Стройиздат, 1973. – 432 с.
4. Алмаев А.Ю. Преимущества и недостатки плоских и вакуумных коллекторов солнечной энергии [Электронный ресурс] / А.Ю. Алмаев, И.А. Лушкин. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/preimuschestva-i-nedostatki-ploskih-i-vakuumnyh-kollektorov-solnechnoy-energii>.
5. Алоян Р.М. Моделирование теплового состояния материала при протекании в нём экзотермической реакции / Р.М. Алоян, М.Е. Лебедев, Н.В. Виноградова // Строительные материалы. – 2007. – № 9. – С. 74 – 75.
6. Андрейченко А.В. Тепловая обработка изделий в камерах пузырькового типа с использованием солнечной энергии / А.В. Андрейченко, М.М. Цесельский // Бетон и железобетон. – 1988. – № 5. – С. 15 – 16.
7. Аруова Л.Б. Использование солнечной энергии для гелиотермообработки бетона в Республике Казахстан [Электронный ресурс] / Л.Б. Аруова, Н.Т. Даужанов // Режим доступа: http://zimbeton.ru/article/2012_10_3.pdf.
8. Аруова Л.Б. Тепловая обработка полистиролбетона [Электронный ресурс] / Л.Б. Аруова, Н.Т. Даужанов. – Режим доступа: http://www.rusnauka.com/21_NNP_2010/Chimia/70756.doc.htm.

9. Атоян В.Р. Снижение энергетических и материальных затрат при изготовлении изделий / В.Р. Атоян, И.Н. Малый // Бетон и железобетон. – 1992. – № 12. – С. 22 – 23.
10. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона / И.Н. Ахвердов. – М. : Стройиздат, 1981. – 464 с.
11. Бабицкий В. Длительность предварительной выдержки бетона с химическими добавками [Электронный ресурс] / В. Бабицкий, М. Голшани, М. Бирик. – Режим доступа: <http://bsc.by/story/dlitelnost-predvaritelnoy-vyderzhki-betona-s-himicheskimi-dobavkami>.
12. Бабицкий В.В. Прогнозирование характеристик твердеющего тяжёлого бетона / В.В. Бабицкий, С.Д. Семенюк, М.С. Бирик // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. пр. – Рівне : НУВГП, 2009. – Выпуск 18. – С. 3 – 12.
13. Баженов Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. – М. : АСВ. 2002. – 500 с.
14. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика / В.Г. Батраков. – М., 1998. – 768 с.
15. Бирик М.С. Об энергосберегающих режимах тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий [Электронный ресурс] / М.С. Бирик, В.В. Бабицкий. – Режим доступа: <http://rep.bntu.by/handle/data/9119>.
16. Бирик М.С. О возможности расчёта энергосберегающих режимов тепловлажностной обработки бетона [Электронный ресурс] / М.С. Бирик, В.В. Бабицкий. – Режим доступа: http://zimbeton.ru/article/2011_10_1.pdf.
17. Бирик М.С. Определение основных режимов трапецеидального режима тепловлажностной обработки бетона / М.С. Бирик, В.В. Бабицкий, С.Д. Семенюк // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. пр. – Рівне : НУВГП, 2011. – Выпуск 22. – С. 22 – 28.
18. Бирик М.С. Оценка кинетики твердения цементного камня с использованием термодатчиков системы «Термохрон» [Электронный

- ресурс] / М.С. Бибик, В.В. Бабицкий. – Режим доступа: <http://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/9105/%D0%A1.%2023-26.pdf?sequence=1>.
19. Бибик М.С. Расчёт энергосберегающих режимов тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий [Электронный ресурс] / М.С. Бибик, В.В. Бабицкий. – Режим доступа: http://www.nbuv.gov.ua/portal/natural/knizh/2009_3/2.pdf.
 20. Бибик М.С. Расчётно-экспериментальная методика оптимизации режима тепловлажностной обработки бетона [Электронный ресурс] / М.С. Бибик, В.В. Бабицкий. – Режим доступа: <http://rep.bntu.by/handle/data/9509>.
 21. Богословский В.Н. Строительная теплофизика / В.Н. Богословский. – М. : Высш. школа, 1982. – 415 с.
 22. Бойко В.Е. Тепловая обработка в производстве сборного железобетона / В.Е. Бойко, Е.В. Тихомиров. – К. : Будівельник, 1987. – 144 с.
 23. Борисов А.А. Классификация реакционной активности цементов в присутствии суперпластификаторов / А.А. Борисов, В.И. Калашников, П.В. Ашеулов // Строительные материалы. – 2002. – № 1. – С. 10 – 12.
 24. Будівельно-технічні властивості цементів, одержаних з використанням альтернативного палива [Електронний ресурс] / Т.М. Круць, Т.Є. Марків, М.А. Саницький, О.В. Ушеров-Маршак, А.В. Кабусь. – Режим доступа: <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/10438/1/28.pdf>.
 25. Бурова З.А. Калориметрическая методика определения теплофизических характеристик при гидратации цемента в плотном слое [Электронный ресурс] / З.А. Бурова, Л.В. Декуша, Л.И. Воробьёв. – Режим доступа: <http://www.sworld.com.ua/konfer40/210.pdf>.
 26. Бутт Ю.М. Твердение вяжущих при повышенных температурах / Ю.М. Бутт, Л.Н. Рашкович. – М. : Изд-во л-ры. по стр-ву, 1965. – 222 с.
 27. Бутт Ю.М. Химическая технология вяжущих материалов / Ю.М. Бутт, М.М. Сычев, В.В. Тимашев; под ред. В.В. Тимашева. – М. : Высш. школа, 1980. – 472 с.

28. Васильев А.С. Эффективность добавок-ускорителей схватывания и твердения для торкрет-бетона [Электронный ресурс] / А.С. Васильев, Ю.Г. Барабанщиков. – Режим доступа: https://www.allbeton.ru/upload/mediawiki/474/effektivnost-dobavok-_-uskoriteley-skhvatyvaniya-i-tverdeniya-dlya-torkret_betona-_vasilev_.pdf.
29. Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества / А.В. Волженский, Ю.С. Буров, В.С. Колокольников. – М. : Стройиздат, 1979. – 476 с.
30. Волков О.Д. Проектирование вентиляции промышленного здания / О.Д. Волков. – Харьков : Вища школа, 1989. – 240 с.
31. Влияние процессов тепло- и массообмена на распределение влаги и изменение критерия Кирпичёва в бетоне при различных способах его тепловой обработки / Н.И. Гамаюнов, А.Е. Афанасьев, Л.А. Малинина и др. // Тепло- и массоперенос при новых способах теплового воздействия на твердеющий бетон. – К. : Будівельник, 1973. – С. 68 – 75.
32. Внутренние санитарно-технические устройства. Часть 1. Отопление: справочник проектировщика / В.Н. Богословский, Б.А. Крупнов, А.Н. Сканава и др.; под ред. И.Г. Староверова и Ю.И. Шиллера. – М. : Стройиздат, 1990. – 344 с.
33. ВСН 2-93-81. Инструкция по тепловой обработке сборных изделий из бетона и железобетона в среде продуктов сгорания природного газа. – М. : ВНИИСТ, 1982. – 40 с.
34. В'яжучі речовини / Р.Ф. Рунова, Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін, Ю.Л. Носовський. – К. : Основа, 2012. – 448 с.
35. Гиндоян А.Г. Тепловой режим конструкций полов / А.Г. Гиндоян. – М. : Стройиздат, 1984. – 222 с.
36. Гныря А.И. Технология бетонных работ в зимних условиях / А.И. Гныря, С.В. Коробков. – Томск : Изд-во Том. гос. архит. – строит. ун-та, 2011. – 412 с.
37. ГОСТ 310.5 – 88. Цементы. Метод определения тепловыделения. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 5 с.

38. Гришан А.А. Использование теплоты, аккумулированной ограждениями пропарочной камеры / А.А. Гришан // Бетон и железобетон. – 1984. – № 3. – С. 13 – 14.
39. Дарчия В.И. Влияние высокомолекулярного хитозана на процесс гидратации цементной композиции [Электронный ресурс] / В.И. Дарчия, Т.П. Никифорова, А.В. Еремин. – Режим доступа: <http://vestnikmgsu.ru/index.php/ru/component/articulus/issue/display/55>.
40. Даужанов Н.Т. Гелиополигоны для производства изделий из пенобетона [Электронный ресурс] / Н.Т. Даужанов, Б.А. Крылов, Л.Б. Аруова. – Режим доступа: <http://vestnikmgsu.ru/files/archive/issues/2014/4/ru/10.pdf>.
41. Даужанов Н.Т. Использование солнечной энергии для гелиотермообработки бетона. [Электронный ресурс] / Н.Т. Даужанов, Л.Б. Аруова. – Режим доступа: http://www.rusnauka.com/7_NMIV_2010/Stroitelstvo/59942.doc.htm.
42. Даужанов Н.Т. Малоэнергоёмкая технология термообработки изделий из пенобетона на полигонах с помощью солнечной энергии [Электронный ресурс] / Н.Т. Даужанов, Б.А. Крылов. – Режим доступа: <http://vestnikmgsu.ru/files/archive/issues/2014/3/ru/17.pdf>.
43. Даужанов Н.Т. Технология гелиотермообработки изделий из пенобетона на полигонах [Электронный ресурс] / Н.Т. Даужанов, Б.А. Крылов, Л.Б. Аруова. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-geliotermostrobitki-izdeliy-iz-penobetona-na-poligonah>.
44. Даффи Дж. А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии: пер. с англ. / Дж. А. Даффи, У.А. Бекман: пер. с англ. – М. : Мир, 1977. – 420 с.
45. ДБН А.3.1-7-96. Управління, організація і технологія. Виробництво бетонних та залізобетонних виробів. – К. : Держкоммістобудування України, 1997. – 53 с.
46. ДБН А.3.1-8-96. Проектування підприємств з виробництва залізобетонних виробів. – К. : Держбуд України, 1998. – 47 с.

47. Дворкін О.Л. Технологія бетону / О.Л. Дворкін. – Рівне : РДТУ, 2001. – 165с.
48. Дербасова Е.М. Анализ и выбор оптимального ИК-оборудования для тепловой обработки бетона в камере инфракрасного нагрева [Электронный ресурс] / Е.М. Дербасова. – Режим доступа: http://agasy.pf/files/documents/44-redaktor/nauka/izdaniya/nauch_potentsial/2/6-11.pdf.
49. Дослідження процесу тепловологісної обробки бетонних виробів в пропарювальній камері з аеродинамічним нагрівачем [Електронний ресурс] / І.В. Коц, А.С. Моргун, В.І. Савуляк та ін. – Режим доступу: <http://stmkvb.vntu.edu.ua/index.php/stmkvb/article/view/235/235>.
50. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 123 с.
51. ДСТУ Б В.2.7-46:2010. Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 25 с.
52. ДСТУ Б В.2.7-47-96. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення морозостійкості. – К. : Держкоммістобудування України, 1997. – 15 с.
53. ДСТУ Б В.2.7-71:98. Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико-хімічних випробовувань. – К. : Держкомбуд архіт. і житл. політики України, 1999. – 47 с.
54. ДСТУ Б В.2.7-75:98. Будівельні матеріали. Щебінь та гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Технічні умови. – К. : Держкомбуд архіт. і житл. політики України, 1999. – 14 с.
55. ДСТУ Б В.2.7-112:2002. Будівельні матеріали. Цементи. Загальні технічні вимоги. – К. : Держбуд України, 2002. – 39 с.
56. ДСТУ Б В.2.7-185:2009. Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення нормальної густоти, строків тужавлення та рівномірності зміни об'єму. – К. : Мінрегіонбуд України, 2010. – 10 с.
57. ДСТУ Б В.2.7-187:2009. Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення міцності на згин і стиск. – К. : Мінрегіонбуд України, 2010. – 22 с.

58. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. – К. : Мінрегіонбуд України, 2010. – 43 с.
59. ДСТУ Б В.2.7-215:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Правила підбору складу. – К. : Мінрегіонбуд України, 2010. – 13 с.
60. ДСТУ Б В. 2.7-225:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Метод визначення тепловиділення при твердненні. – К. : Мінрегіонбуд України, 2010. – 12 с.
61. ДСТУ Б В.2.7-232:2010. Пісок для будівельних робіт. Методи випробувань. – К. : Мінрегіонбуд України, 2010. – 44 с.
62. ДСТУ-Н Б В.2.7-299:2013. Настанова щодо визначення складу важкого бетону. – К. : Мінрегіон України, 2014. – 86 с.
63. ДСТУ ISO 3696:2003. Вода для застосування в лабораторіях. Вимоги та методи перевіряння. – К. : Держспоживстандарт України, 2004. – 7 с.
64. Дудар І.Н. Використання сонячної енергії для термосилової обробки бетону [Електронний ресурс] / І.Н. Дудар, В.Л. Гарнага, С.В. Яківчук. – Режим доступу: <http://stmkvb.vntu.edu.ua/index.php/stmkvb/article/view/329/327>.
65. Дудар І.Н. Економічна ефективність застосування сонячної енергії для термосилової обробки бетону [Електронний ресурс] / І.Н. Дудар, В.Л. Гарнага, С.В. Яківчук. – Режим доступу: <http://stmkvb.vntu.edu.ua/index.php/stmkvb/article/view/352/350>.
66. Желих В.М. Дослідження ексергетичної ефективності низькотемпературних сонячних колекторів [Електронний ресурс] / В.М. Желих, Х.Р. Лесик, Б.І. Пізнак. – Режим доступу: <http://stmkvb.vntu.edu.ua/index.php/stmkvb/article/view/290/288>.
67. Запорожец И.Д. Тепловыделение бетона / И.Д. Запорожец, С.Д. Окороков, А.А. Парийский. – Л.– М. : Изд-во л-ры по стр-ву, 1966. – 314 с.
68. Заседателев И.Б. Гелиотермообработка сборного железобетона / И.Б. Заседателев, Е.Н. Малинский, Е.С. Темкин. – М. : Стройиздат, 1990. – 312 с.

69. Заседателев И.Б. Использование солнечной энергии для тепловой обработки железобетонных изделий / И.Б. Заседателев, Е.Н. Малинский, Е.С. Темкин // Бетон и железобетон. – 1983. – № 9. – С. 2 – 3.
70. Заседателев И.Б. Тепловая обработка изделий с применением систем промышленного гелиотеплоснабжения / И.Б. Заседателев, П.В. Мазманян // Бетон и железобетон. – 1988. – № 5. – С. 7 – 9.
71. Заседателев И.Б. Тепловыделение цемента при твердении бетона в гелиоформах / И.Б. Заседателев, Е.Н. Малинский, М.М. Абдуллаев // Бетон и железобетон. – 1983. – № 11. – С. 16 – 18.
72. Заседателев И.Б. Тепло- и массоперенос в бетоне специальных промышленных сооружений / И.Б. Заседателев, В.Г. Петров-Денисов. – М. : Изд-во л-ры по стр-ву, 1973. – 168 с.
73. Золотухин Ю.Д. Экономичная камера пропаривания / Ю.Ж. Золотухин, А.Г. Ташкинов, С.Ю. Звегинцева // Бетон и железобетон. – 1983. – № 9. – С. 7– 8.
74. Изотов В.С. Влияние некоторых гиперпластификаторов на основные свойства цементных композиций / В.С. Изотов, Р.А. Ибрагимов // Строительные материалы. – 2010. – № 11. – С. 14 – 16.
75. Изотов В.С. Химические добавки для модификации бетона / В.С. Изотов, Ю.А. Соколова. – М. : Палеотип, 2006. – 244 с.
76. Изучение прогрева бетона в теплоаккумулирующих гелиокамерах [Электронный ресурс] / Ф.Б. Усмонов, Р.К. Ибодов, Ф.С. Хикматов, Б.М. Одинаев. – Режим доступа: https://drive.google.com/file/d/0Bxwxnt_0wPHqZzV6VWduRVF0WW8/view.
77. Исаченко В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М. : Энергоиздат, 1981. – 416 с.
78. Исследование параметров электротепловой обработки бетона токами различной частоты / С.В. Федосов, В.И. Бобылев, Ю.А. Митькин, А.М. Соколов // Строительные материалы. – 2009. – № 4. – С. 102 – 104.

79. Исследование суточной прочности бетона при электротепловой обработке бетона токами различной частоты / С.В. Федосов, В.И. Бобылев, Ю.А. Митькин, А.М. Соколов // Строительные материалы. – 2010. – № 3. – С. 52 – 53.
80. Касторных Л.И. Добавки в бетоны и строительные растворы / Л.И. Касторных. – Ростов-на Дону : Феникс, 2007. – 221 с.
81. Казбек - Казиев З.А. Некоторые особенности температурных напряжений (с учётом ползучести) при тепловом воздействии на твердеющий бетон / З.А. Казбек - Казиев // Тепло- и массоперенос при новых способах теплового воздействия на твердеющий бетон. – К. : Будівельник, 1973. – С. 139 – 144.
82. Кареке Г.Т. Использование солнечной энергии при производстве полистиролбетонных изделий [Электронный ресурс] / Г.Т. Кареке, М.З. Абдикаримова. – Режим доступа: http://www.rusnauka.com/6_PNI_2013/Stroitelstvo/4_126244.doc.htm.
83. Колесник Е.П. Материальный баланс паровоздушной смеси в пропарочной камере с аэродинамическим нагревателем роторного типа [Электронный ресурс] / Е.П. Колесник, И.В. Коц. – Режим доступа: <http://www.bstu.by/uploads/vestnik/13-2/25.pdf>.
84. Колісник О.П. Використання аеродинамічного нагрівання при тепловологісній обробці бетонних дорожніх конструкцій [Електронний ресурс] / О.П. Колісник, І.В. Коц. – Режим доступу: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/addb_90.pdf.
85. Колісник О.П. Дослідження робочого процесу обробки бетонних виробів у пропарювальній камері з аеродинамічним нагрівачем роторного типу [Електронний ресурс] / О.П. Колісник, О.С. Жеболенко, І.В. Коц. – Режим доступу: http://www.rusnauka.com/20_DNI_2013/Tecnic/3_142666.doc.htm.
86. Колісник О.П. Математична модель тепловологісної обробки бетонних виробів з використанням аеродинамічного нагріву [Електронний ресурс] / О.П. Колісник. – Режим доступу: <http://library.kpi.kharkov.ua/Vestnik/>

2009_45.pdf.

87. Колісник О.П. Процеси тепломасообміну при тепловій обробці бетонних виробів [Електронний ресурс] / О.П. Колісник. – Режим доступу: <http://vestnik.kpi.kharkov.ua/files>.
88. Колісник О.П. Ресурсозберігаюча технологія тепловологісної обробки спеціальних бетонних виробів [Електронний ресурс] / О.П. Колісник, І.В. Коц, О.І. Павлюк. – Режим доступу: http://www.rusnauka.com/23_NPM_2011/Stroitelstvo/1_91571.doc.htm.
89. Коршунов М.А. Ресурсосберегающая технология обработки железобетонных изделий / М.А. Коршунов, С.И. Калиниченко, П.И. Улько. – К. : Будівельник, 1987. – 46 с.
90. Коц І.В. Ексергетичний аналіз теплових процесів технології виготовлення будівельних виробів [Електронний ресурс] / І.В. Коц, О.П. Колісник. – Режим доступу: <http://stmkvb.vntu.edu.ua/index.php/stmkvb/article/view/143/143>.
91. Кошельник В.М. Дослідження енергоефективності процесу термообробки залізобетонних виробів при застосуванні різних видів теплоносіїв [Електронний ресурс] / В.М. Кошельник, Ю.В. Шульгін, О.І. Глинько. – Режим доступу: http://vestnik.kpi.kharkov.ua/files/turbine/vestnik%202012/2012_7/7_2012_27.pdf.
92. Красовский П.С. Физико-химические основы формирования структуры цементных бетонов / П.С. Красовский. – Хабаровск : Издат. ДВГУПС, 2013. – 204 с.
93. Крылов Б.А. Некоторые вопросы обеспечения равномерного температурного поля в бетоне при электрообогреве / Б.А. Крылов, А.Ф. Кравченко // Тепло- и массоперенос при новых способах теплового воздействия на твердеющий бетон. – К. : Будівельник, 1973. – С.134 – 139.
94. Крылов Б.А. Дублирующие источники энергии при комбинированной гелиотермообработке сборного железобетона / Б.А. Крылов, В.П. Маслов // Бетон и железобетон. – 1988. – № 5. – С. 9 – 10.

95. Крылов Б.А. Комбинированная гелиотермообработка железобетонных изделий в Республике Казахстан / Б.А. Крылов, Л.Б. Аруова // Бетон и железобетон. – 2007. – № 4. – С.11–13.
96. Кугаєвська Т.С. Аналіз інтенсивності нагрівання повітря в плоскому колекторі сонячної енергії / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін, В.П. Сопов // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2016. – Випуск 3 (85). – С. 201– 205.
97. Кугаєвська Т.С. Аналіз можливості прогнозування зміни температури бетонних виробів при їх твердінні без використання теплоносія в теплий період року / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін // Збірник наукових праць. Сер.: Галузеве машинобудування, будівництво / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. – Полтава : ПолтНТУ, 2013. – Випуск 1 (36), том 2. – С. 70 – 75.
98. Кугаєвська Т.С. Визначення втрат теплоти крізь надземні конструкції, що огорожують камери для тепловологої обробки бетонних виробів / Т.С. Кугаєвська, Л.В. Бондар, Є.І. Пищенко // Тези 66-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету (Полтава, 15 квітня – 15 травня 2014 р.). – Полтава : ПолтНТУ, 2014. – Том 3. – С. 140 – 141.
99. Кугаєвська Т.С. Визначення інтенсивності нагрівання бетонної суміші у формувальному цеху в холодний період року / Т.С. Кугаєвська, Л.В. Бондар, Є.І. Пищенко // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2014. – Випуск 3 (77). – С. 70 – 74.
100. Кугаєвська Т.С. Визначення швидкості нагрівання надземних конструкцій, що огорожують пропарювальні камери періодичної дії / Т.С. Кугаєвська // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2010. – Випуск 60. – С. 119 – 123.
101. Кугаєвська Т.С. Використання нагрітого повітря для теплової обробки бетонних виробів / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін, В.П. Сопов // Моделювання та оптимізація будівельних композитів: матеріали

- міжнародного науково-технічного семінару (Одеса, 27 – 28 жовтня 2016 р.). – Одеса : ОДАБА, 2016. – С. 68 – 71.
102. Кугаєвська Т.С. Доцільність використання для прискорення твердіння бетонних виробів нагрітого повітря / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін, Р.В. Квіта // Тези 66-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету (Полтава, 15 квітня – 15 травня 2014 р.). – Полтава : ПолтНТУ, 2014. – Том 3. – С. 138 – 139.
103. Кугаєвська Т.С. Економічні аспекти використання нагрітого повітря для прискорення твердіння бетонних виробів / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін, В.П. Сопов // Проблеми й перспективи розвитку академічної та університетської науки: збірник наукових праць за матеріалами ІХ Міжнародної науково-практичної конференції (Полтава, 7 – 9 грудня 2016 р.). – Полтава : ПолтНТУ, 2016. – С. 277 – 282.
104. Кугаєвська Т.С. Експериментальне обґрунтування доцільності визначення ступеня прогрівання теплоізоляційного боксу при дослідженні екзотермії цементу / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін // Збірник наукових праць. Сер.: Галузеве машинобудування, будівництво / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. – Полтава : ПолтНТУ, 2013. – Випуск 4 (39), том 2. – С. 107 – 113.
105. Кугаєвська Т.С. Експериментальні дослідження тепловиділення цементу в тверднучих теплоізолюваних бетонних зразках / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2013. – Випуск 73. – С. 223 – 230.
106. Кугаєвська Т.С. Лабораторні дослідження теплової обробки бетонних зразків нагрітим повітрям / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2014. – Випуск 4 (78). – С. 276 – 282.
107. Кугаєвська Т.С. Метод дослідження процесів теплової обробки бетонних виробів нагрітим повітрям / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін, В.П. Сопов //

Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2016. – Випуск 2 (84). – С.245 – 249.

108. Кугаєвська Т.С. «Метод пластини» для орієнтовного визначення тепловиділення цементу при його гідратації в повітряних умовах / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін // Тези 64-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету (Полтава, 17 квітня – 11 травня 2012 р.). – Полтава : ПолтНТУ, 2012. – Том 3. – С. 135 – 136.
109. Кугаєвська Т.С. Метод прогнозування термінів набору міцності бетонними виробами при їх твердненні з використанням тільки теплоти, яка виділяється при гідратації цементу / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін // Проблеми й перспективи розвитку академічної та університетської науки: збірник наукових праць за матеріалами VI Всеукраїнської науково-практичної конференції (Полтава, 19 – 20 грудня 2013 р.). – Полтава : ПолтНТУ, 2013. – С. 233 – 237.
110. Кугаєвська Т.С. Моделювання процесів теплової обробки бетонних виробів нагрітим повітрям / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін, В.П. Сопов // Тези 68-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету (Полтава, 19 квітня – 13 травня 2016 р.). – Полтава : ПолтНТУ, 2016. – Том 3. – С. 82 – 83.
111. Кугаєвська Т.С. Опрацювання лабораторної установки для теплової обробки бетонних зразків нагрітим повітрям / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін, О.В. Свінін // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2014. – Випуск 1 (75). – С. 77– 80.
112. Кугаєвська Т.С. Основні положення методу прогнозування термінів набору міцності бетонними виробами при їх твердненні без використання теплоносія / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін // Збірник наукових праць. Сер.: Галузеве машинобудування, будівництво / Полтавський

національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. – Полтава : ПолтНТУ, 2014. – Випуск 1 (40). – С. 302 – 310.

113. Кугаєвська Т.С. Особливості складання теплоповітряних балансів формувального цеху заводу ЗБВ у холодний період року / Т.С. Кугаєвська, Л.В. Бондар // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2015. – Випуск 1 (79). – С. 136 – 140.
114. Кугаєвська Т.С. Особливості теплотехнічного розрахунку блоку пропарювальних камер періодичної дії / Т.С. Кугаєвська // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2010. – Випуск 58. – С. 187 – 191.
115. Кугаєвська Т.С. Принцип дії лабораторної установки для теплової обробки бетонних зразків із використанням нагрітого в колекторі сонячної енергії повітря / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін, О.В. Свінін // Тези 65-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету (Полтава, 22 квітня – 15 травня 2013 р.). – Полтава : ПолтНТУ, 2013. – Том 4. – С. 91– 92.
116. Кугаєвська Т.С. Принцип дії лабораторної установки для теплової обробки бетонних зразків нагрітим повітрям / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін, О.В. Свінін // Збірник наукових праць студентів та викладачів факультету нафти і газу та природокористування Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. – Полтава : ПолтНТУ, 2014. – Випуск 6. – С. 119 – 125.
117. Кугаєвська Т.С. Принципи теплопостачання камер для теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів із використанням нагрітого в колекторі сонячної енергії теплоносія / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін, О.В. Свінін // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2013. – Випуск 72. – С. 319 – 324.
118. Кугаєвська Т.С. Процеси теплообміну в камері для теплової обробки бетонних виробів нагрітим повітрям / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін //

Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2015. – Випуск 4 (82). – С.177 – 182.

119. Кугаєвська Т.С. Процеси теплообміну в плоскому колекторі сонячної енергії / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін, М.О. Юрченко // Збірник наукових праць. Сер.: Галузеве машинобудування, будівництво / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. – Полтава : ПолтНТУ, 2015. – Випуск 3 (45). – С.257 – 264.
120. Кугаєвська Т.С. Розроблення методів визначення інтенсивності тепловиділення цементу при його гідратації в повітряних умовах та в теплоізолюваних зразках / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін // Збірник наукових праць. Сер.: Галузеве машинобудування, будівництво / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. – Полтава : ПолтНТУ, 2012. – Випуск 5 (35). – С. 166 – 170.
121. Кугаєвська Т.С. Розроблення «методу пластини» для орієнтовного визначення інтенсивності тепловиділення цементу при його гідратації / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2012. – Випуск 68. – С.191 – 195.
122. Кугаєвська Т.С. Розроблення «методу теплоізолюваного зразка» для визначення інтенсивності тепловиділення цементу при його гідратації / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2012. – Випуск 69. – С. 201 – 205.
123. Кугаєвська Т.С. Теплова обробка бетонних зразків нагрітим повітрям у лабораторній установці / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін // Збірник наукових праць. Сер.: Галузеве машинобудування, будівництво / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. – Полтава : ПолтНТУ, 2014. – Випуск 3 (42), том 3. – С. 112 – 121.
124. Кугаєвська Т.С. Тепловий баланс колектора сонячної енергії / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2015. – Випуск 2 (80). – С. 232 – 236.

125. Кугаєвська Т.С. Теплові баланси камери для теплової обробки бетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін, В.П. Сопов // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2016. – Випуск 1 (83). – С.138 – 143.
126. Кугаєвська Т.С. Теплові баланси камери для теплової обробки бетонних виробів нагрітим повітрям / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін, М.О. Юрченко // Збірник наукових праць. Сер.: Галузеве машинобудування, будівництво / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. – Полтава : ПолтНТУ, 2015. – Випуск 2 (44). – С. 203 – 208.
127. Кугаевская Т.С. Исследование тепловой обработки бетонных образцов нагретым воздухом / Т.С. Кугаевская, В.В. Шульгин // Новые идеи нового века – 2015: материалы 15-й Международной научной конференции (Хабаровск, 23 февраля – 2 марта 2015 г.). – Хабаровск : ТОГУ, 2015. – Том 3. – С. 220 – 226.
128. Кугаевская Т.С. Комплексное использование нагретого в коллекторе воздуха для тепловой обработки бетонных изделий / Т.С. Кугаевская, В.В. Шульгин, В.П. Сопов // Эффективные технологические решения в строительстве с использованием бетонов нового поколения: материалы международной научно-практической конференции (Харьков, 28 – 29 октября 2015 г.). – Харьков : ХНУСА, 2015. – С. 143 –146.
129. Кугаевская Т.С. Методика лабораторных исследований процесса тепловой обработки бетонных образцов нагретым воздухом в холодный период года / Т.С. Кугаевская, В.В. Шульгин, А.В. Свинин // Материалы международной научно-практической конференции «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе» (Пермь, 24 – 25 апреля 2014 г.). – Пермь : ПНИПУ, 2014. – С. 450 – 452.
130. Кугаевская Т.С. Методы определения выделения теплоты цементом при его гидратации в теплоизолированных образцах и в воздушных условиях / Т.С. Кугаевська, В.В. Шульгін // Новые идеи нового века – 2013:

- материалы 13-й Международной научной конференции (Хабаровск, 18 февраля – 23 февраля 2013 г.). – Хабаровск : ТОГУ, 2013. – Том 2. – С. 361 – 366.
131. Кугаевская Т.С. Основные принципы математического моделирования процесса тепловой обработки бетонных изделий нагретым воздухом / Т.С. Кугаевская, В.В. Шульгин, В.П. Сопов // Новые идеи нового века – 2016: материалы 16-й Международной научной конференции (Хабаровск, 22 февраля – 1 марта 2016 г.). – Хабаровск : ТОГУ, 2016. – Том 3. – С. 285 – 289.
132. Кугаевская Т.С. Особенности первого этапа прогнозирования сроков набора прочности твердеющими без использования теплоносителя бетонными изделиями / Т.С. Кугаевская, В.В. Шульгин // Новые идеи нового века – 2014: материалы 14-й Международной научной конференции (Хабаровск, 24 февраля – 3 марта 2014 г.). – Хабаровск : Издат. ТОГУ, 2014. – Том 3. – С. 314 – 319.
133. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена / С.С. Кутателадзе. – М. : Атомиздат, 1979. – 416 с.
134. Кучеренко А.А. Тепловые установки заводов сборного железобетона. Проектирование и примеры расчёта / А.А. Кучеренко. – К. : Вища школа, 1977. – 280 с.
135. Лариков Н.Н. Теплотехника / Н.Н. Лариков. – М. : Стройиздат, 1985. – 432 с.
136. Лебедев А.П. Влияние плотности теплового потока на интенсивность тепло- и массообменных процессов при тепловой обработке бетона в среде влажного воздуха / А.П. Лебедев, И.И. Станецкая // Тепло- и массоперенос при новых способах теплового воздействия на твердеющий бетон. – К. : Будівельник, 1973. – С.102 – 106.
137. Ленский С.Е. Проектирование и эксплуатация экономичных пропарочных камер / С.Е. Ленский, Л.Н. Беккер, М.М. Цесельский // Бетон и железобетон. – 1984. – № 3. – С. 12 – 13.

138. Лівша Р.Я. Оцінка екзотермії на ранній стадії тверднення цементобетонного покриття [Електронний ресурс] / Р.Я. Лівша, Л.О. Карасьова. – Режим доступу: <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/7655/1/25.pdf>.
139. Ложкин В.П. Производство сборного железобетона без тепловой обработки [Электронный ресурс] / В.П. Ложкин, В.Л. Марцинкевич, И.В. Велецкий. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/proizvodstvo-sbornogo-zhelezobetona-bez-teplovoy-obrabotki>.
140. Лотов В.А. Тепловыделение в системе цемент-вода при гидратации и твердении / В.А. Лотов, Е.А. Сударев, Ю.А. Иванов // Строительные материалы. – 2011. – № 11. – С. 35 – 37.
141. Лыков А.В. Теоретические основы строительной теплофизики / А.В. Лыков. – Минск : Изд-во акад. наук БССР, 1961. – 519 с.
142. Лыков А.В. Теория переноса энергии и вещества / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – Минск : Изд-во акад. наук БССР, 1959. – 330 с.
143. Лыков А.В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – М. – Л. : Гос. энергетическое изд-во, 1963. – 535 с.
144. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М. : Высш. школа, 1967. – 599 с.
145. Лыков А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – М. : Энергия, 1968. – 472 с.
146. Лыков А.В. Тепломассообмен: справочник / А.В. Лыков. – М. : Энергия, 1978. – 480 с.
147. Лыков А.В. Явления переноса в капиллярно-пористых коллоидных телах / А.В. Лыков. – М. : Гос. изд-во техн. - теорет. л-ры, 1954. – 599 с.
148. Малинина Л.А. Тепловлажностная обработка тяжёлого бетона / Л.А. Малинина. – М. : Стройиздат, 1977. – 159 с.
149. Малинский Н.М. Комбинированная гелиотермообработка железобетонных изделий / Н.М. Малинский, М.О. Орозбеков // Бетон и железобетон. – 1988. – № 5. – С. 4 – 7.

150. Мальцев В.Н. О кинетике тепловыделений при затворении и твердении вяжущих [Электронный ресурс] / В.Н. Мальцев, И.В. Власенко, Н.В. Мальцев. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/o-kinetike-teplovydeleniy-pri-zatvorenii-i-tverdenii-vyazhuschih>
151. Мартемьянова Э.Н. Теплотехника и теплотехническое оборудование технологи строительных материалов и изделий / Э.Н. Мартемьянова. – Омск : Сиб АДИ, 2007. – 97 с.
152. Марьямов Н.Б. Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона / Н.Б. Марьямов. – М. : Изд-во л-ры по стр-ву, 1970. – 272 с.
153. Математическая модель твердения бетона в условиях тепловой обработки заводов ЖБИ [Электронный ресурс] / Ю.Ю. Громов, О.Г. Иванова, А.В. Лагутин, Т. Лутхон. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskaya-model-tverdeniya-betona-v-usloviyah-teplovoy-obrabotki-zavodov-zhbi>.
154. Математическое моделирование набора прочности бетоном при электротепловой обработке / С.В. Федосов, В.И. Бобылев, А.М. Ибрагимов и др. // Строительные материалы. – 2012. – № 4. – С. 36 – 39.
155. Методика расчёта предельных температурных градиентов в железобетонных изделиях в процессе электротепловой обработки / С.В. Федосов, В.И. Бобылев, А.М. Ибрагимов, А.М. Соколов // Строительные материалы. – 2011. – № 3. – С. 44 – 46.
156. Метод температурно-временного мониторинга для оценки эффективности добавок в бетоне [Электронный ресурс] / А.В. Ушеров-Маршак, И.А. Михеев, А.В. Кабусь, В.П. Слипушенко. – Режим доступа: http://www.metrology.kharkov.ua/fileadmin/user_upload/data_gc/conference/M2014/pages/04/9.pdf.
157. Методы предупреждения «ложного схватывания» цементов [Электронный ресурс] / Т.М. Петрова, А.Ф. Серенко, М.И. Мелачев, Д.М. Мелачев. – Режим доступа: <http://modifikator.ru/upload/node/pdf/212d0d473d808dbc8b95fc042752017d.pdf>.

158. Миронов С.А. Ускорение твердения бетона / С.А. Миронов, Л.А. Малинина.– М. : Изд-во л-ры по стр-ву, 1964. – 347 с.
159. Миронов С.А. Тепловлажностная обработка сборного железобетона с применением покрывающих водных бассейнов / С.А. Миронов, Л.А. Малинина, Е.Н. Малинский // Тепло- и массоперенос при новых способах теплового воздействия на твердеющий бетон. – К. : Будівельник, 1973. – С. 39 – 46.
160. Миронов С.А. Влияние температурного фактора на процессы гидратации цемента / С.А. Миронов, Л.А. Белова // Тепло- и массоперенос при новых способах теплового воздействия на твердеющий бетон. – К. : Будівельник, 1973. – С. 113 – 124.
161. Михайловский В.П. Расчёты горения топлива, температурных полей и тепловых установок технологии бетонных и железобетонных изделий / В.П. Михайловский, Э.Н. Мартемьянова, В.В. Ушаков; под. общ. ред. В.П. Михайловского. – Омск : Сиб АДИ, 2011. – 262 с.
162. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М. : Энергия, 1977. – 343 с.
163. Моделирование набора прочности бетоном при гидратации цемента / С.В. Федосов, В.И. Бобылев, А.М. Ибрагимов и др. // Строительные материалы. – 2011. – № 11. – С. 38 – 41.
164. Моделирование прогрева стеновых панелей при термической обработке / С.В. Федосов, В.Е. Мизонов, Е.А. Баранцева и др. // Строительные материалы. – 2007. – № 2. – С. 86 – 87.
165. Мчедлов-Петросян О.П. Гидробарометральная обработка цементных бетонов О.П. Мчедлов-Петросян // Тепло- и массоперенос при новых способах теплового воздействия на твердеющий бетон. – К. : Будівельник, 1973. – С.14 – 23.
166. Мчедлов-Петросян О.П. Тепловыделение при твердении вяжущих веществ и бетонов / О.П. Мчедлов-Петросян, А.В. Ушеров-Маршак, А.М. Урженко. – М. : Стройиздат, 1984. – 224 с.

167. Мчедлов-Петросян О.П. Химия неорганических строительных материалов / О.П. Мчедлов-Петросян. – М. : Стройиздат, 1988. – 304 с.
168. Мхитарян Н.М. Основы гелиотермообработки щелочных бетонов. Автореферат диссертации / Н.М. Мхитарян. – Ереван, 1996. – 49 с.
169. Недуєв Ю.М. Енергозберігаючий спосіб прискорення твердіння бетону у початковий період (вибір типу комплексної добавки) / Ю.М. Недуєв, Т.О. Недуєв // Бетон и железобетон в Украине. – 2012. – № 1. – С. 5 – 8.
170. Недуєв Ю.М. Спосіб приготування мінеральної затравки – центру кристалізації при твердінні портландцементу / Ю.М. Недуєв, О.М. Гукасян // Бетон и железобетон в Украине. – 2012. – № 4. – С. 2 – 4.
171. Несветаев Г.В. Тепловыделение при гидратации и предел прочности цементного камня [Электронный ресурс] / Г.В. Несветаев, Та Ван Фан. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/29trgsu313.pdf>.
172. Нестационарный процесс теплопереноса в монолитном железобетонном перекрытии при использовании термоактивной опалубки. Часть 2 / С.В. Федосов, А.М. Ибрагимов, Л.Ю. Гнедина и др. // Строительные материалы. – 2006. – № 3. – С. 70.
173. Нестеренко А.В. Основы термодинамических расчётов вентиляции и кондиционирования воздуха / А.В. Нестеренко. – М. : Высш. школа, 1971. – 460 с.
174. Новоселов В.А. Некоторые вопросы проектирования гелиополигонов / В.А. Новоселов, Р.А. Великолепов, В.Т. Филиппов // Бетон и железобетон. – 1988. – № 5. – С. 19 – 20.
175. Обьещенко Г.А. Эффективность термосной технологии тепловой обработки изделий / Г.А. Обьещенко, Р.В. Вегенер // Бетон и железобетон. – 1984. – № 3. – С. 15 – 16.
176. Обьещенко Г.А. Эффективные тепловые методы интенсификации твердения бетона / Г.А. Обьещенко, С.М. Трембицкий // Бетон и железобетон. – 1991. – № 4. – С.11 – 13.

177. Опрацювання «методу теплоізованого зразка» для визначення екзотермії цементу при гідратації / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін, О.С. Богомазова, Л.В. Жевлакова // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2013. – Випуск 71. – С. 260 –264.
178. Оптимизация режимов тепловлажностной обработки железобетонных изделий и конструкций / М.С. Бирик, И.И. Тулупов, В.В. Бабицкий, С.Д. Семенюк // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. пр. – Рівне : НУВГП, 2012. – Випуск 23. – С. 22 – 30.
179. Оптимизация состава цементных композитов с применением наполнителей месторождений Чеченской Республики [Электронный ресурс] / Э.М. Балатханова, В.Т. Ерофеев, Ю.М. Баженов и др. – Режим доступа: <http://www.vestnikmgsu.ru/index.php/archive/articles/display/keyword/2094>.
180. Осадчий Г.Б. Гелиокамера ускоренного твердения ячеистого бетона Осадчий Г.Б. // Строительные материалы. – 2006. – № 6. – С. 16 – 17.
181. Отопление и вентиляция. Часть 1. Отопление / П.Н. Каменев, А.Н. Сканави, В.Н. Богословский и др. / под ред. В.Н. Богословского – М. : Стройиздат, 1975. – 483 с.
182. Отопление и вентиляция. Часть 2. Вентиляция / В.Н. Богословский, В.И. Новожилов, Б.Д. Симаков, В.П. Титов / под ред. В.Н. Богословского. – М. : Стройиздат, 1976. – 439 с.
183. Павлюк В.В. Модифіковані композиційні системи для виконання робіт в зимових умовах / В.В. Павлюк, Л.В. Терещенко, К.В. Бондар // Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка: наук.-техн. зб. – К. : «Знання» України, 2010. – Випуск 38. – С. 28 – 32.
184. Павлюк В.В. Оцінка впливу суперпластифікаторів на процеси тепловиділення цементів загальнобудівельного призначення [Електронний ресурс] / В.В. Павлюк, Л.В. Терещенко, К.В. Бондар. – Режим доступу: http://www.archive.nbu.gov.ua/portal/natural/Budv/2009_50/68.pdf.
185. Павлюк В.В. Оцінка тепловиділення цементу загальнобудівельного призначення, модифікованого хімічними добавками / В.В. Павлюк,

- Л.В. Терещенко, К.В. Бондар // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. пр. – Рівне : НУВГП, 2010. – Випуск 20. – С. 82 – 87.
186. Пат. № 24545 Республика Казахстан, МПК С04В 41/00, С04В 32/00. Способ тепловой обработки бетонных изделий / Н.Т. Даужанов, Л.Б. Аруова; заявл. 05.01.10; опубл. 15.09.11, бюл. № 9.
187. Пат. № 25072 Республика Казахстан, МПК С04 В 41/00. Способ тепловой обработки строительных изделий из полистиролбетонной смеси / Н.Т. Даужанов, Л.Б. Аруова; заявл. 06.09.10; опубл. 15.12.11, бюл. № 12.
188. Пат. № 28207 Республика Казахстан, МПК С01В 7/43. Способ тепловой обработки арболитовых строительных изделий / Л.Б. Аруова, Н.Т. Даужанов, Крылов Б.А.; заявл. 27.06.12; опубл. 17.03.14, бюл. № 3.
189. Пат. WO2015126231 A1. Установка тепловой обработки бетонных изделий [Электронный ресурс] / Л.Б. Аруова, Н.Т. Даужанов, К.А. Бисенов, Б.А. Крылов, Б.В. Гусев; заявл. 10.02.14; опубл. 27.08.15. – Режим доступа: <http://www.google.com/patents/WO2015126231A1?cl=ru&hl=ru>.
190. Пат. № 28410 Україна, МПК С04В 40/02. Спосіб теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів і конструкцій / М.Ш. Файнер; заявник і патентоутримувач М.Ш. Файнер; заявл. 11.01.97; опубл. 16.10.00 р., бюл. № 5.
191. Пат. № 40453 Україна, МПК С04В 40/00. Пропарювальна камера / О.П. Колісник, І.В. Коц; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет; заявл. 05.11.08; опубл. 10.04.09, бюл. № 7.
192. Пат. № 40455 Україна, МПК С04В 40/00. Спосіб тепловологісної обробки будівельних виробів / О.П. Колісник, І.В. Коц; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет; заявл. 05.11.08; опубл. 10.04.09, бюл. № 7.
193. Пат. № 76923 Україна, МПК (2006. 01) С04В 40/00. Устаткування для виготовлення будівельних виробів / І.В. Коц, І.Н. Дудар, О.П. Колісник;

- заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет; заявл. 13.06.12; опубл. 25.01.13, бюл. № 2.
194. Пат. № 83714 Україна, МПК (2013.01) F24H 3/00. Спосіб використання сонячної енергії для теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін, О.В. Свінін; заявник і патентовласник Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка; заявл. 01.04.13; опубл. 25.09.13, бюл. № 18.
195. Пат. № 84944 Україна, МПК (2013.01) F24J 2/00, F24J 3/00. Спосіб використання сонячної енергії для прискорення твердіння бетонних і залізобетонних виробів / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін, О.В. Свінін; заявник і патентовласник Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка; заявл. 01.04.13; опубл. 11.11.13, бюл. № 21.
196. Пат. № 90487 Україна, МПК С04В 40/02 (2006.01). Спосіб теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін; заявник і патентовласник Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка; заявл. 13.01.14; опубл. 26.05.14, бюл. № 10.
197. Пат. № 95443 Україна, МПК С04В 40/00. Пропарювальна камера / І.В. Коц, О.П. Колісник, І.О. Янчук; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет; заявл. 27.06.14; опубл. 25.12.14, бюл. № 24.
198. Пат. № 99426 Україна, МПК (2012.01) G01N 33/38 (2006.01) С04В 28/00. Особливошвидкотверднучий безпропарювальний бетон / А.А. Пługін, А.М. Пługін, О.В. Романенко, О.А. Пługін, О.А. Калінін, Д.А. Пługін, С.В. Мірошніченко; заявник і патентовласник Українська державна академія залізничного транспорту; заявл. 14.12.11; опубл. 10.08.12; бюл. № 15.
199. Пат. № 1005409 Україна, МПК (2015.01). E04G 21/00, B28D 1/00, F24J 2/00. Установа для теплової обробки бетонних і залізобетонних

виробів / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін; заявник і патентовласник Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка; заявл. 04.03.15; опубл. 27.07.15, бюл. № 14.

200. Пат. № 2028996 Российская Федерация, МПК С04В40/02. Способ тепловой обработки изделий из тяжёлого бетона / С.А. Дикань, М.А. Коршунов, Н.Н. Куприянов; заявитель и патентообладатель: Полтавский инженерно-строительный институт; заявл. 24.06.91; опубл. 20.02.95.
201. Пат. № 2052431 Российская Федерация, МПК С04В40/02. Способ тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий / В.В. Филиппов, В.Я. Филиппова, Б.Г. Ерышалов, Е.Л. Корольков; заявитель и патентообладатель: индивидуальное частное внедренческое научно-производственное малое предприятие «ГУЕР»; заявл. 26.05.92; опубл. 20.01.96.
202. Пат. № 2100323 Российская Федерация, МПК С04В40/02, В28В11/24. Способ тепловлажностной обработки изделий / А.А. Макогон, А.Ф. Утенков, Э.Б. Пинсон; заявители и патентообладатели: А.А. Макогон, А.Ф. Утенков, Э.Б. Пинсон; заявл. 19.06.92; опубл. 27.12.97.
203. Пат. № 2170397 Российская Федерация, МПК F26В3/00, F24J2/00. Гелиоустановка для термообработки бетонных и железобетонных изделий / В.И. Григорян, А.Г. Бегларян, Л.К. Бчмян, В.А. Аветисян; заявитель и патентообладатель Ереванский архитектурно-строительный институт; заявл. 14.12.99; опубл. 10.07.01.
204. Пат. № 2170895 Российская Федерация, МПК F26В3/00, F24J2/00. Гелиоустановка для термообработки бетонных и железобетонных изделий / В.И. Григорян, А.Г. Бегларян, В.А. Аветисян, Л.К. Бчмян; заявитель и патентообладатель Ереванский архитектурно-строительный институт; заявл. 14.12.99; опубл. 20.07.01.
205. Пат. № 2214330 Российская Федерация, МПК С04 В40/00. Способ изготовления бетонных и железобетонных изделий и установка для его осуществления / Е.П. Маков, С.П. Маков, В.П. Хлебов, Н.А. Сузев;

- заявители и патентообладатели: Е.П. Маков, С.П. Маков, В.П. Хлебов, Н.А. Сузев; заявл. 01.04.02; опубл. 20.10.03.
206. Пат. № 2360879 Российская Федерация, МПК С04В22/08, С04В24/16, С04В24/08, С04В103/14. Комплексная добавка / Т.М. Петрова, А.Ф. Серенко; заявители и патентообладатели: Т.М. Петрова, А.Ф. Серенко; заявл. 12.06.07; опубл. 10.07.09.
207. Пат. № 2444682 Российская Федерация, МПК F24J2/02, F26B3/28. Солнечный тепловой коллектор / Л.В. Кузнецова, И.И. Полосин, Т.В. Щукина; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования, Воронежский государственный архитектурно-строительный университет ГОУВПО ВГАСУ; заявл. 09.07.10; опубл. 10.03.12.
208. Пат. № 2475714 Российская Федерация, МПК G01K17/08. Дифференциальный микрокалориметр и способ измерения тепловыделения / Ю.А. Иванов, В.А. Лотов; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Техноаналит"; заявл. 22.09.10; опубл. 20.02.13.
209. Пат. № 2519080 Российская Федерация, МПК С04В. Способ тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий / О.М. Смирнова; заявитель и патентообладатель О.М. Смирнова; заявл. 11.05.12; опубл. 20.11.13.
210. Перегудов В.В. Тепловые процессы и установки в технологии строительных изделий и деталей / В.В. Перегудов, М.И. Роговой. – М. : Стройиздат, 1983. – 416 с.
211. Перегудов В.В. Теплотехника и теплотехническое оборудование / В.В. Перегудов; под ред. Н.Ф. Ерёмкина. – М. : Стройиздат, 1990. – 336 с.
212. Перспективы использования солнечной энергии для изготовления мостовых конструкций / А.Р. Соловьянчик, А.С. Бейвель, В.П. Величко, В.Е. Малинский // Бетон и железобетон. – 1988. – № 5. – С. 17 – 19.

213. Петрова Т.М. Экономические основы внедрения беспропарочных технологий при производстве сборных железобетонных конструкций [Электронный ресурс] / Т.М. Петрова, А.Ф. Серенко, А.П. Лейкин. – Режим доступа: <http://sbcmi.ru/ekonomicheskie-osnovy-vnedreniyabesproparchnyh-tehnologij-pri-proizvodstve-sbornyh-zhelezobetonnyh-konstruktsij/>.
214. Пинсон Э.Б. Тепловая обработка сборного железобетона продуктами сгорания природного газа // Э.Б. Пинсон // Бетон и железобетон. – 1984. – № 3. – С. 20, 21.
215. Плешка М.С. Разработка и исследование солнечного воздушного коллектора [Электронный ресурс] / М.С. Плешка, П.М. Вырлан. – Режим доступа: <http://www.c-o-k.ru/articles/razrabotka-i-issledovanie-solnechnogo-vozdushnogo-kollektora>.
216. Плешка М.С. Разработка и экспериментальные исследования матричного солнечного воздушного коллектора [Электронный ресурс] / М.С. Плешка, П.М. Вырлан. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-i-eksperimentalnye-issledovaniyamatrichnogosolnechnogo-vozdushnogo-kollektora-1>.
217. Плотникова Л.Г. Влияние тепловой обработки на пористость бетона [Электронный ресурс] / Л.Г. Плотникова, А.П. Пичугин, Ю.А. Веригин. – Режим доступа: http://elib.altstu.ru/elib/books/Files/pv2012_01_2/pdf/093plotnikova.pdf.
218. Подгорнов Н.И. Использование солнечной энергии при изготовлении бетонных изделий / Н.И. Подгорнов. – М. : Стройиздат, 1989. – 144 с.
219. Подгорнов Н.И. Свойства бетона, приготовленного на предварительно нагретых материалах / Н.И. Подгорнов, В.П. Сизов, В.П. Глушков // Бетон и железобетон. – 1988. – № 2. – С.13, 14.
220. Подгорнов Н.И. Термообработка бетона в опалубочных формах с использованием солнечной энергии / Н.И. Подгорнов, Т.В. Аппарович, Д.Д. Коротеев // Известия высших учебных заведений. Сер.: Строительство и архит. – 2009. – № 6. – С. 35 – 42.

221. Подгорнов Н.И. Термообработка бетона с использованием солнечной энергии / Н.И. Подгорнов. – М. : АСВ, 2010. – 328 с.
222. Подгорнов Н.И. Энергетическая оценка использования солнечной энергии для термообработки железобетонных изделий / Н.И. Подгорнов, Д.Д. Коротеев // Вестник РУДН. Сер.: Инженерные исследования. – 2011. – № 2. – С. 48 –51.
223. Подгорнов Н.И. Энергосберегающая технология термообработки бетона с использованием солнечной энергии. Часть 1 [Электронный ресурс] / Н.И. Подгорнов. – Режим доступа: http://www.best-strou.ru/view_art.php?id_=104&lng_=ru.
224. Подгорнов Н.И. Энергосберегающая технология термообработки бетона с использованием солнечной энергии. Часть 2 [Электронный ресурс] / Н.И. Подгорнов. – Режим доступа: http://beststrou.ru/view_art.php?id_=114&lng_=ru.
225. Пособие по тепловой обработке железобетонных изделий продуктами сгорания газа (к СНиП 3.09.01 – 85). – М. : Прейскурантиздат, 1988. – 32 с.
226. Пособие по тепловой обработке сборных железобетонных конструкций и изделий (к СНиП 3.09.01 – 85). – М. : Стройиздат, 1989. – 56 с.
227. Проведение калориметрического анализа в процессе гидратации бетонных смесей на установке ИТ-7С [Электронный ресурс] / А.А. Мендрул, З.А. Бурова, Л.В. Декуша и др. – Режим доступа: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/60523/11Mendrul.pdf?sequence=1>.
228. Пуляев С.М. Исследование влияния добавки ViskoCrete 5 Neu на тепловыделение бетона / С.М. Пуляев, А.Р. Соловьянчик, И.С. Пуляев // Строительные материалы. – 2011. – № 5. – С. 14 – 15.
229. Пунагин В.Н. Энергосберегающая технология тепловой обработки бетона / В.Н. Пунагин, А.М. Годованников, Г.И. Джурицкий // Бетон и железобетон. – 1995. – № 1. – С.14 – 15.
230. Принципы выбора комплексных добавок для беспропарочной технологии производства бетона и железобетона / Т.М. Петрова, А.Ф. Серенко,

- М.И. Милачев, Д.М. Милачев // Строительные материалы. – 2010. – № 7. – С. 62 – 63.
231. Расчёт с помощью ЭВМ температурных и влажностных полей деформаций и напряжений, возникающих при тепловлажностной обработке на стадии остывания бетонных изделий / К.Э. Горяйнов, А.Н. Счастный, А.В. Нехорошев и др. // Тепло- и массоперенос при новых способах теплового воздействия на твердеющий бетон. – К. : Будівельник, 1973. – С. 85 – 90.
232. Ратинов В.Б. Добавки в бетон / В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг. – М. : Стройиздат, 1989. – 188 с.
233. Ратц Е.М. Анализ эффективности применения химических добавок для тяжёлого бетона с целью сокращения сроков производства бетонных работ [Электронный ресурс] / Е.М. Ратц, И.Н. Хряпченкова. – Режим доступа: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2015/11/2015-%E2%84%962%D0%A0%D0%B0%D1%82%D1%86.pdf>.
234. Рекомендации по тепловой обработке бетонных и железобетонных изделий в гелиоформах со светопрозрачным теплоизолирующим покрытием (СВИАП). – М. : НИИЖБ, 1984. – 21 с.
235. Романенко О.В. Аналіз матеріалів для виробництва залізобетонних шпал на заводах ЗБШ / О.В. Романенко // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2015. – Випуск 2 (80). – С.133 – 140.
236. Романенко О.В. Уточнення оптимальної витрати добавки суперпластифікатора при виробництві залізобетонних шпал без тепловологісної обробки / О.В. Романенко, А.А. Плуґін, В.О. Яковлев // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків : УкрДАЗТ, 2010. – Випуск 115. – С. 97 – 103.
237. Руденко Н.Н. Особенности процесса структурообразования активированной цементной матрицы бетона [Электронный ресурс] / Н.Н. Руденко, Д.В. Руденко, В.В. Пунагин. – Режим доступа: <http://ecat.diit.edu.ua/bitstream/123456789/2284/1/32.pdf>.

238. Руководство по подбору составов тяжёлого бетона. – М. : Стройиздат, 1979. – 103 с.
239. Руководство по прогреву бетона в монолитных конструкциях / под ред. Б.А. Крылова, С.А. Амбарцумяна, А.И. Звездава. – М. : РААСН, НИИЖБ, 2005. – 275 с.
240. Руководство по предварительной оценке термонапряжённого состояния массивных железобетонных фундаментных плит на ранней стадии твердения бетона [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.forum-100.ru/UPLOAD/user/files/ruk_cvk.pdf.
241. Рунова Р.Ф. Анализ термонапряжённого состояния фундаментной плиты и рекомендации по уходу за ней при бетонировании [Электронный ресурс] / Р.Ф. Рунова, В.В. Троян. – Режим доступа: <http://beton-profi.ru/matmod.pdf>.
242. Рунова Р.Ф. Хімічні добавки як регулятор тепловиділення бетону [Електронний ресурс] / Р.Ф. Рунова, В.В. Троян, О.В. Прянішніков. – Режим доступа: <http://concrete-performance.narod.ru/6.pdf>.
243. Рыбасов В.П. Гелиотермообработка железобетона с применением плёнкообразующих составов / В.П. Рыбасов, И.В. Быкова // Бетон и железобетон. – 1988. – № 5. – С. 22 – 23.
244. Санталов С.В. Оптимизация режима термообработки изделий в пропарочной камере / С.В. Санталов // Бетон и железобетон. – 1983. – № 9. – С. 5 – 6.
245. Сердюк В.І. Вплив теплових та вологісних режимів на процеси твердіння бетонів / В.І. Сердюк // Бетон и железобетон в Украине. – 2009. – № 1. – С. 9 – 11.
246. Сидоренко М.В. Контроль распалубочной прочности бетона изделий при гелиотехнологии / М.В. Сидоренко, А.М. Лещинский, Е.М. Майданик // Бетон и железобетон. – 1988. – № 5. – С. 21 – 22.
247. Смирнов Ю. Система управления тепловлажностной обработкой железобетонных изделий [Электронный ресурс] / Ю. Смирнов. – Режим доступа: <http://www.cta.ru/cms/f/342628.pdf>.

248. Солдаткин М.Т. Массо- и теплоперенос при тепловой обработке изделий из тяжёлого бетона в электроиндукционной установке с теплоизлучающими поверхностями / М.Т. Солдаткин, В.В. Артихович // Тепло- и массоперенос при новых способах теплового воздействия на твердеющий бетон. – К. : Будівельник, 1973. – С.107 – 113.
249. Сопов В.П. Ранние стадии гидратации в присутствии добавок «Релаксол» / В.П. Сопов, Л.А. Першина, Л.Н. Решетник // Хімічні і мінеральні добавки в бетон / за заг. ред. О.В. Ушерова-Маршака. – Харків : Колорит, 2005. – С. 176 – 186.
250. Состояние и перспективы использования калориметрии в технологии цемента и бетона [Электронный ресурс] / А.В. Ушеров-Маршак, А.В. Кабусь, Н.Н. Исаенко и др. – Режим доступа: http://fxmtbmv.ucoz.ru/KCSM/sostojanie_i_perspektivy_ispolzovaniya_kalorimetri.pdf.
251. Степаненко И.В. Твердение бетонов в условиях контактного подвода теплоты [Электронный ресурс] / И.В. Степаненко. – Режим доступа: http://zimbeton.ru/article/2012_10_5.pdf.
252. Строй А.Ф. Расчёт и проектирование тепловых сетей / А.Ф. Строй, В.Л. Скальский. – К. : Будівельник, 1981. – 144 с.
253. Ступаков Г.И. Использование солнечной энергии для тепловой обработки бетона / Г.И. Ступаков // Бетон и железобетон. – 1988. – № 5. – С. 24 – 25.
254. Тейлор Х. Химия цемента / Х. Тейлор: пер. с англ. – М. : Мир, 1996. – 550 с.
255. Темкин Е.С. Гелиотермообработка железобетонных изделий при конвейерном производстве / Е.С. Темкин, С.С. Спивак, Л.И. Фарбман // Бетон и железобетон. – 1988. – № 5. – С. 11 – 12.
256. Температурный мониторинг твердения цементных систем / А.В. Кабусь, Н.Н. Исаенко, Е.А. Мороз, Е.В. Иващенко, Е.Б. Воропаева // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА ХОТВ АБУ, 2011. – Випуск 65. – С. 256 – 263.

257. Тепловая обработка бетонных изделий с использованием коллектора солнечной энергии / Т.С. Кугаевская, В.В. Шульгин, В.П. Сопов, Д.В. Гузик // Материалы международной научно-практической конференции «Проблемы экологии и энергоэффективности в современном строительстве» (Баку, 24 – 25 ноября 2016 г.). – Баку : Азербайджанский архитектурно-строительный университет, 2016. – С. 47 – 50.
258. Теплові процеси та установки / В.І. Гоц, В.М. Кокшарьов, В.В. Павлюк, С.А. Тимошенко. – К. : Основа, 2014. – 360 с.
259. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: справочник / под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – М. : Энергоиздат, 1982. – 512 с.
260. Теплоснабжение / В.Е. Козин, Т.А. Левина, А.П. Марков и др. – М. : Высш. школа, 1980. – 408 с.
261. Технология бетона, строительных изделий и конструкций / Ю.М. Баженов, Л.А. Алимов, В.В. Воронин, У.Х. Магдеев. – М. : АСВ, 2004. – 256 с.
262. ТКП 45-5.03-13-2005 (02250). Вырабы бетонныя і жалезабетонныя зборныя. Правілы цеплавільготнаснай апрацоўкі. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2006. – 56 с.
263. Торговников Б.М. Проектирование промышленной вентиляции: справочник / Б.М. Торговников, В.Е. Табачник, В.М. Ефанов. – К. : Будівельник, 1983. – 256 с.
264. Торопова М.В. Процессы структурообразования при тепловлажностной обработке бетона [Электронный ресурс] / М.В. Торопова. – Режим доступа: http://www.rusnauka.com/8_DNI_2009/Stroitelstvo/42993.doc.htm.
265. Трембицкий С.М. Применение электроэнергии при тепловой обработке сборного железобетона / С.М. Трембицкий, А.И. Ли // Бетон и железобетон. – 1984. – № 3. – С. 18 – 19.
266. Трембицкий С.М. Энергосберегающие технологии изготовления железобетонных изделий и конструкций / С.М. Трембицкий // Бетон и железобетон. – 2004. – № 6. – С. 23 – 26.

267. Троян В.В. Термонапружений стан залізобетону як аспект довговічності монолітних конструкцій [Електронний ресурс] / В.В. Троян. – Режим доступу: <http://beton-profi.ru/papers/14.pdf>.
268. Турдалиев Ш.Э. Перспективный способ тепловой обработки бетона [Электронный ресурс] / Ш.Э. Турдалиев. – Режим доступа: <http://arch.kyrlibnet.kg/uploads/KRSUTURDALIEVSh.E.2005-7.pdf>.
269. Уласевич В.П. Влияние режимов тепловлажностной обработки на прочность тяжелых бетонов с добавкой STG-3, изготовленных в условиях завода КУП «Брестжилстрой» [Электронный ресурс] / В.П. Уласевич, О.А. Якубовская, З.Н. Уласевич. – Режим доступа: <http://www.bstu.by/uploads/vestnik/13-1/27.pdf>.
270. Ушеров-Маршак А.В. Бетоны нового поколения – бетоны с добавками [Электронный ресурс] / А.В. Ушеров-Маршак. – Режим доступа: http://slavutich-media.ru/catalog/beton_i_zhelezobeton/0/betoni_novogo_pokoleniya__betoni_s_dobavkami.html.
271. Ушеров-Маршак А.В. Взаимосвязь кинетики тепловыделения и прочности при твердении вяжущих веществ и бетонов / А.В. Ушеров-Маршак, П.В. Кривенко, Л.А. Першина // Калориметрия цемента и бетона: избранные труды / под. ред. А.В. Ушерова-Маршака. – Х. : Факт, 2002. – С. 54 – 57.
272. Ушеров-Маршак А.В. Добавки в бетон: прогресс и проблемы / А.В. Ушеров-Маршак // Строительные материалы. – 2006. – № 10. – С. 8 – 12.
273. Ушеров-Маршак А.В. Информационная система температурно-временного мониторинга влияния добавок на твердение цемента и бетона [Электронный ресурс] / А.В. Ушеров-Маршак, А.В. Кабусь, И.А. Михеев. – Режим доступа: http://fxmtbmv.ucoz.ru/KCSM/informacionnaja_sistema_temperaturno-remennogo_mo.pdf.
274. Ушеров-Маршак А.В. Калориметрический мониторинг ранних стадий твердения цементов в присутствии добавок [Электронный ресурс] /

А.В. Ушеров-Маршак, А.В. Кабусь. – Режим доступа: http://fxmtbmv.ucoz.ru/KCSM/kalorimetriceskij_monitoring_rannikh_stadij_tverd.pdf.

275. Ушеров-Маршак А.В. Калориметрия цемента и бетона: избранные труды / под. ред. А.В. Ушерова-Маршака. – Харьков : Факт, 2002. – 183 с.
276. Ушеров-Маршак А.В. Общие закономерности процессов твердения неорганических вяжущих веществ / А.В. Ушеров-Маршак, А.А. Сень // Калориметрия цемента и бетона: избранные труды / под. ред. А.В. Ушерова-Маршака. – Харьков : Факт, 2002. – С. 38 – 41.
277. Ушеров-Маршак А.В. О скорости тепловыделения цементов при повышенных температурах / А.В. Ушеров-Маршак, А.А. Сень // Калориметрия цемента и бетона: избранные труды / под. ред. А.В. Ушерова-Маршака. – Харьков : Факт, 2002. – С. 48 – 50.
278. Ушеров-Маршак А.В. Совместимость – тема бетоноведения и ресурс технологи бетона / А.В. Ушеров-Маршак, М. Циак // Строительные материалы. – 2009. – № 10. – С. 12 – 15.
279. Ушеров-Маршак А.В. Тепловыделение при твердении цементов в программируемых неизотермических условиях / А.В. Ушеров-Маршак, А.И. Коробов, А.Г. Синякин // Калориметрия цемента и бетона: избранные труды / под. ред. А.В. Ушерова-Маршака. – Харьков : Факт, 2002. – С. 24 – 26.
280. Ушеров-Маршак А.В. Термокинетический фактор в твердении цемента / А.В. Ушеров-Маршак, А.Г. Синякин // Калориметрия цемента и бетона: избранные труды / под. ред. А.В. Ушерова-Маршака. – Харьков : Факт, 2002. – С. 57 – 58.
281. Ушеров-Маршак А.В. Химические добавки в бетон / А.В. Ушеров-Маршак // Хімічні і мінеральні добавки в бетон / за заг. ред. О.В. Ушерова-Маршака. – Харьков : Колорит, 2005. – С. 24 – 39.
282. Ушкелбаева А.О. Гелиотермообработка полистиролбетонов, арболитов через гелиосистему с промежуточным теплоносителем [Электронный

ресурс] / А.О. Ушкелбаева. – Режим доступа: http://kazatu.kz/science/vn1501_teh08.pdf.

283. Федосов С.В. Влияние тепловлажностной обработки на прочность железобетонных ограждающих конструкций и изделий / С.В. Федосов, А.М. Ибрагимов, А.В. Гуцин // Строительные материалы. – 2006. – № 9. – С. 7 – 8.
284. Федосов С.В. Двусторонний прогрев бетона в монолитной железобетонной фундаментной плите с использованием термоактивной опалубки / С.В. Федосов, А.М. Ибрагимов, С.А. Нестеров // Строительные материалы. – 2007. – № 12. – С. 26, 27.
285. Федосов С.В. Моделирование тепловых процессов при монолитном бетонировании с учётом теплового эффекта гидратации цемента / С.В. Федосов, А.М. Ибрагимов, С.А. Нестеров // Строительные материалы. – 2008. – № 3. – С. 34 – 35.
286. Федосов С.В. Нестационарный процесс теплопереноса в монолитном железобетонном перекрытии при использовании термоактивной опалубки. Часть 1 / С.В. Федосов, А.М. Ибрагимов, А.В. Гуцин // Строительные материалы. – 2006. – № 2. – С. 56 – 57.
287. Фокин В.М. Основы технической теплофизики / В.М. Фокин, Г.П. Бойков, Ю.В. Видин. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 172 с.
288. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К.Ф. Фокин; под ред. Ю.А. Табунщикова, В.Г. Гагарина. – 5-е изд., пересмотр. – М. : АВОК-ПРЕСС, 2006. – 256 с.
289. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки / Н.В. Харченко. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 208 с.
290. Хигерович М.И. Гидрофобно-пластифицирующие добавки для цементов, растворов и бетонов / М.И. Хигерович, В.Е. Байер. – М. : Стройиздат, 1979. – 126 с.
291. Цветков В.В. Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона / В.В. Цветков. – К. : Будівельник, 1978. – 112 с.

292. Цветков Ф.Ф. Тепломассообмен / Ф.Ф. Цветков, Б.А. Григорьев. – М. : МЭИ, 2005. – 550 с.
293. Цементобетоны на основе золошлаковых смесей для условий сухого жаркого климата / С-А.Ю. Муртазаев, Н.В. Чернышева, С.А. Алиев, Б.Т. Муртазаев // Вестник Дагестанского государственного университета. – Махачкала : ДГТУ, 2011. – № 2 (Том 21). – С.126 – 130.
294. Циак М. Анализ взаимосвязи термокинетических показателей гидратации и свойств цемента / М. Циак, С.В. Коваль // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. пр. – Рівне : НУВГП, 2009. – Випуск 4 (48). – С. 10 – 16.
295. Циак М. Влияние температуры на кинетику гидратации цементов, взаимодействующих с суперпластификатором [Электронный ресурс] / М. Циак. – Режим доступа: http://pk.napks.edu.ua/library/compilations_vak/sitb/2009/29/p_80_88.pdf.
296. Циак М. О совместимости «цемент – добавка» / М. Циак // Хімічні і мінеральні добавки в бетон / за заг. ред. О.В. Ушерова-Маршака. – Харків : Колорит, 2005. – С. 40 – 44.
297. Циак М. Термокинетический поход к прогнозированию эффективности модификаторов бетона / М. Циак // Будівельні конструкції: міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць. Сер.: Будівництво. – К. : ДП НДІБК, 2009. – Випуск 72. – С. 69 – 77.
298. Цыро В.В. Тепловая обработка изделий из керамзитобетона в продуктах сгорания природного газа / В.В. Цыро, Н.Т. Скиба // Бетон и железобетон. – 1983. – № 11. – С. 18.
299. Чемоданов Д.И. Физико-химическая механика оксидных систем / Д.И. Чемоданов, Н.Н. Круглицкий, Ю.С. Саркисов. – Томск : Изд-во Томского университета, 1989. – 230 с.
300. Чермянин Н.Р. Сравнительные исследования внешнего массообмена при пропаривании и беспропаровом прогреве бетона в связи с деформацией и прочностью / Н.Р. Чермянин, М.Г. Вержбицкая, В.М. Загико // Тепло- и

массоперенос при новых способах теплового воздействия на твердеющий бетон. – К. : Будівельник, 1973. – С. 53 – 62.

301. Чесноков А.Г. Светопропускание оконных конструкций и различные способы достижения нормативных результатов [Электронный ресурс] / А.Г. Чесноков. – Режим доступа: http://www.glassinfo.ru/articles/2000_11_svetopropuskanie_okon_i_dostigenie_ego.pdf.
302. Чорна Н.О. Застосування прозорої ізоляції та її роль в загальному теплообміні геліоколектора [Електронний ресурс] / Н.О. Чорна. – Режим доступу: <http://dspace.nbuiv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/60428/14/ChornaNEW.pdf?sequence=1>.
303. Шестаков Н.И. Методика расчёта термо- и влагонапряжённого состояния бетонных плит, подвергаемых тепловлажностной обработке / Н.И. Шестаков, К.В. Аксенчик // Строительные материалы. – 2012. – № 11. – С. 77 – 80.
304. Шифрин С.А. Роль процессов испарения влаги при гелиотермообработке бетона / С.А. Шифрин // Бетон и железобетон. – 1988. – № 5. – С. 25 – 26.
305. Штакельберг Д.И. Энергетика развития структурно-влажностного состояния при твердении цементно-бетонных композиций / Д.И. Штакельберг, Б.И. Вильге, С.В. Бойко// Строительные материалы. – 2011. – № 9. – С. 57 – 60.
306. Штрипов И.К. Влияние ввода гранулометрического шлага на тепловыделение при его гидратации [Электронный ресурс] / И.К. Штрипов, Д.В. Корниенко, А.С. Ряполов. – Режим доступа: <http://www.eduherald.ru/pdf/2015/6/61.pdf>.
307. Щукина Т.В. Гелиотермообработка с использованием средств повышения энергооблученности строительных изделий [Электронный ресурс] / Т.В. Щукина, Семенова Е.Ю. – Режим доступа: http://www.rusnauka.com/28_NII_2012/Tecnic/5_118020.doc.htm.

308. Щукина Т.В. Повышение энергоактивности гелиотермообработки строительных изделий / Т.В. Щукина // Строительные материалы. – 2008. – № 10. – С. 20 – 23.
309. Экономическая эффективность гелиотермообработки бетонных композитов на техногенном сырье [Электронный ресурс] / Х.Э. Таймасханов, Д.К.-С. Батаев, С.-А.Ю. Муртазаев, С.А. Алиев. – Режим доступа: http://ecsocman.hse.ru/data/2013/05/20/1251470880/Pages%20from%20ver_201203-15.pdf.
310. Экспериментальные исследования тепловлажностной обработки бетона продуктами сгорания природного газа / А.Д. Корнеев, В.Я. Губарев, Д.С. Синельников, В.Г. Соловьёв // Строительные материалы. – 2007. – № 1. – С. 30 – 31.
311. Юдаев Б.Н. Теплопередача / Б.Н. Юдаев. – М.: Высш. школа, 1973. – 360 с.
312. Якимов А.И. Температурный градиент при термообработке плит перекрытий / А.И. Якимов, В.Н. Конев // Бетон и железобетон. – 1996. – № 4. – С. 15.
313. Якубов В.А. Гелиотермообработка изделий на предприятиях стройиндустрии Таджикистана / В.А. Якубов, А.М. Приев // Бетон и железобетон. – 1988. – № 5. – С. 13, 14.
314. Ashish N. Sarode. Experimental and Computational Fluid Dynamics Analysis of a New Flat Plate Solar Collector [Electronic resource] / Ashish N. Sarode, Dr. Atul A. Patil, V.H. Patil. – Access mode: http://www.ijettjournal.org/Special%20issue/ICGTETM-2016/ICGTETM_2016_paper_128.pdf.
315. Aymenov Zh. Helio-technical systems and prospects of their use for heat treatment of slag-alkali concrete [Electronic resource] / Zh. Aymenov. – Access mode: <http://ite.ukgu.kz/sites/default/files/files/02032012.pdf>.
316. CFD Analysis of Solar Flat Plate Collector [Electronic resource] / P.W. Ingle, A.A.Pawar, B.D. Deshmukh, K.C. Bhosale. – Access mode: http://www.ijetae.com/files/Volume3Issue4/IJETAЕ_0413_59.pdf.

317. Contrastive Numerical Investigations on Thermo-Structural Behaviors in Mass Concrete with Various Cements / Wei Zhou, Chuqiao Feng, Xinghong Liu, Shuhua Liu, Chao Zhang and Wei Yuan. – Material. – 2016. – № 9 (5), 378. – pp. 1–19.
318. Dauzhanov N.T. Low-energy thermal processing technology of foamed concrete products in landfills using solar energy [Electronic resource] / N.T. Dauzhanov, B.A. Krylov. – Access mode: <http://vestnikmgsu.ru/index.php/ru/archive/article/download/125>.
319. Duffie J.A. Solar Engineering of Thermal Processes [Electronic resource] / J.A. Duffie, W.A. Beckman. – Access mode: http://www.magsoft.com.pl/~herbatniczek/naslon/files/Solar_Engineering_of_Thermal_Processes.pdf.
320. Effect of thermal treatment on properties of high strength concrete [Electronic resource] / N. Toropovs, D. Bajare, G. Shakhmenko, A. Korjakins, J. Justs. – Access mode: http://llufb.llu.lv/conference/Civil_engineering/2013/partI/Latvia_CivilEngineering2013Vol4PartI_129-133.pdf.
321. Elsabé Kearsley. Heat evolution due to cement hydration in foamed concrete [Electronic resource] / Elsabé Kearsley, Derek Mostert. – Access mode: <https://www.researchgate.net/publication/273129401>.
322. Fabio Struckmann. Analysis of a Flat-plate Solar Collector [Electronic resource] / Fabio Struckmann. – Access mode: http://www.lth.se/fileadmin/ht/Kurser/MVK160/Project_08/Fabio.pdf.
323. Fatima A. Al-Qadri. Effect of some admixtures on heat of hydration reaction of cement pastes produced in Yemen, Saudi Arabia, and Egypt / Fatima A. Al-Qadri, A.M. Saad, Affaf Ahmed Aldlaee // Journal of Engineering Sciences, Assiut University. – 2009. Vol. 37, No. 5. – P. 1041–1048.
324. Greensmith, Christopher Graeme. The effects of cement extenders and water to binder ratio on the heat evolution characteristics of concrete [Electronic resource] / Greensmith, Christopher Graeme. – Access mode: <http://wiredspace.wits.ac.za/handle/10539/1516>.

325. Hashim Abdul Razak. The effect of heat treatment on the compressive strength of cement-slag mortars [Electronic resource] / Hashim Abdul Razak, Fathollah Sajedi. – Access mode: http://www.researchgate.net/publication/230805967_The_effects_of_heat_treatment_on_compressive_strength_of_cementslag_mortars.
326. Heat treatment of concrete and its influence on the mechanical properties [Electronic resource] / Sana Elkacemi, Latifa Abahlous, Said Ait Amar, Larbi Boukbir, Noureddine El Alem. – Access mode: http://www.mateconferences.org/articles/mateconf/abs/2014/02/mateconf_cmss2013_01011/mateconf_cmss2013_01011.html.
327. Knor G. Determination of thermal properties of hardening concrete containing high calcium fly ash / G. Knor, J Holnicki-Szulc & M.A. Glinicki // 14th, International Conference Structural Faults and Repair, Volume: 1, 3rd – 5th July 2012, Edinburgh.
328. Kugaevska T.S. Definitions consumption of heat on heating designs chambers for thermal treatment concrete products / T.S. Kugaevska, V.V. Shulgin // Collection of scientific articles «Energy, energy saving and rational nature use» / Kazimierz Pulaski University of Technology and Humanities in Radom. – Radom, Poland, 2015. – № 1 (4). – P. 42 – 48.
329. Kugaevska T.S. Development of methodology forecasting of intensity solidification concrete products in the alternative methods of heat treatment / T.S. Kugaevska // Energy, energy saving and rational nature use. – Oradea, Romania: Oradea University Press, 2015. – P. 4 – 52.
330. Kugaevska T.S. Heat balance camera at thermal cooling concrete products / T.S. Kugaevska, V.V. Shulgin, V.P. Sopov // Collection of scientific articles «Energy, energy saving and rational nature use» / Kazimierz Pulaski University of Technology and Humanities in Radom. – Radom, Poland, 2016. – № 1 (6). – P. 12 – 17.
331. Kugaevska T.S. Laboratory research of heat treatment concrete samples heated air in the collector solar energy / T.S. Kugaevska, V.V. Shulgin // Проблеми й

перспективи розвитку академічної та університетської науки: збірник наукових праць за матеріалами VII Всеукраїнської науково-практичної конференції (9 – 12 грудня 2014 року). – Полтава : ПолтНТУ, 2014. – С. 21 – 24.

332. Kugaevska T.S. Peculiarities heat exchange in solar collector and in chambers for heat treatment concrete products heated air / T.S. Kugaevska // The special aspects energy and resource saving. – Oradea, Romania: Oradea University Press, 2015. – P. 78 – 122.
333. Kugaevska T.S. Processes of mass transfer in period loading chamber of concrete products / T.S. Kugaevska, V.V. Shulgin // Collection of scientific articles «Energy, energy saving and rational nature use» / Kazimierz Pulaski University of Technology and Humanities in Radom. – Radom, Poland, 2015. – № 2 (5). – P. 36 – 42.
334. Kugaevska T.S. Thermal treating of concrete samples heated air / T.S. Kugaevska, V.V. Shulgin // Collection of scientific articles «Energy, energy saving and rational nature use» / Kazimierz Pulaski University of Technology and Humanities in Radom. – Radom, Poland, 2014. – P. 21 – 25.
335. Kugaevska T.S. Thermal treatment the concrete samples heated air in the collector energy / T.S. Kugaevska, V.V. Shulgin // Collection of scientific articles «Energy, energy saving and rational nature use» / Kazimierz Pulaski University of Technology and Humanities in Radom. – Radom, Poland, 2014. – № 2 (3). – P. 66 – 73.
336. Kugaevskaya T.S. Development of prediction method of concrete products temperature changes under their curing / T.S. Kugaevskaya, V.V. Shulgin // Conference reports materials «Problems of energy saving and nature use 2013». – Budapest, Hungary , 2014. – P. 46 – 52.
337. Maruyama I. Numerical Modeling of Portland Cement Hydration Based on Particle Kinetic Model and Multi-Component Concept / I. Maruyama, T. Matsushita, T. Noguchi. – Proc. of Int. Cong. on Chem. of Cem., TH1-08.3, 2007. – 7 p.

338. Nadiradze A. Usage of solar energy in the production of concrete and iron concrete [Electronic resource] / Nadiradze A. – Access mode: [http://www.energyonline.ge/energyonline/images/upload/April%202010/statAnzor%20Nadiradze%20\(eng\).pdf](http://www.energyonline.ge/energyonline/images/upload/April%202010/statAnzor%20Nadiradze%20(eng).pdf).
339. Paulini P. A Through Solution Model for Volume Changes of Cement Hydration / P. Paulini // Cement and Concrete Research. – 1994. – Vol. 24, No. 3. – P. 488 – 496.
340. Performance analysis of solar flat plate collector [Electronic resource] / S. Irfan Sadaq, S. Nawazish Mehdi, Ishrath M.M, Afroz Mehar, NBV. Lakshmi Kumari. – Access mode: http://www.iraj.in/up_proc/pdf/130-142624173551-56.pdf.
341. Relating Compressive Strength to Heat Release in Mortars [Electronic resource] Dale P. Bentz, Tim Barrett, Igor De la Varga, W. Jason Weissa. – Access mode: http://concrete.nist.gov/~bentz/Heatreleasetostrength_011912.pdf.
342. Sakir Erdogdu. Optimum heat treatment cycle for cements different in type and composition [Electronic resource] / Sakir Erdogdu, Sirin Kurbetci. – Access mode: <http://www.e-kutuphane.imo.org.tr/pdf/679.pdf>.
343. Steven H. Kosmatka. Design and Control of Concrete Mixtures, EB001/ Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, Panarese William C. Panarese // 14th edition, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2003.
344. Sunil. K. Amrutkar. Solar Flat Plate Collector Analysis [Electronic resource] / Sunil. K. Amrutkar, Satyshree Ghodke, Dr. K. N. Patil. – Access mode: http://www.iosrjen.org/Papers/vol2_issue2/F022207213.pdf.
345. The Effect of Heat Treatment on the Properties of Ultra High Strength Concrete [Electronic resource] / Girts Bumanis, Nikolajs Toropovs, Laura Dembovska, Diana Bajare, Aleksandrs Korjakins. – Access mode: <http://imateh.rtu.lv/wp-content/uploads/sites/28/2015/02/The-Effect-of-Heat-Treatment-on-the-Properties-of-Ultra-High-Strength-Concrete.pdf>.
346. The technology of production of precast concrete by using Solar energy in Kazakhstan [Electronic resource] / Lyazat Aruova, Kylyshbay Aldabergenovich

Bissenov, Nabi Dauszhanov, Aizhan Utkelbaeva, Kamalbek Baitasov, Galymzhan Karshyga, Rakhimzhan Karshygaev. – Access mode: <http://www.globalilluminators.org/wp-content/uploads/2015/05/MI-BEST-15-186.pdf>.

347. Uğur Öztürk A. Katkilarin çimento hamuru hidratasyon isisina etkileri [Electronic resource] / A. Uğur Öztürk. – Access mode: <http://birimler.dpu.edu.tr/app/views/panel/ckfinder/userfiles/16/files/Dergiler/14/08.pdf>.

348. Vasudeva Karanth K. Numerical Simulation of a Solar Flat Plate Collector using Discrete Transfer Radiation Model (DTRM) – A CFD Approach [Electronic resource] / K. Vasudeva Karanth, M.S. Manjunath, N. Yagnesh Sharma. – Access mode: http://www.iaeng.org/publication/WCE2011/WCE2011_pp2355-2360.pdf.

ДОДАТОК А

Розрахункові схеми лабораторних камер

для визначення тепловиділення цементу при гідратації

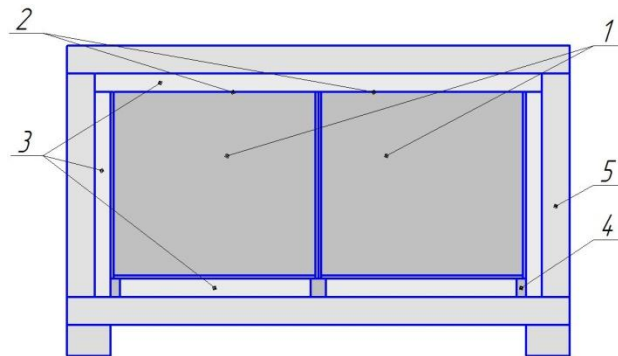


Рис. А.1. Схема 1 лабораторної камери:

1 – форми з тверднучим бетоном; 2 – гідроізоляційний матеріал;

3 – додатковий теплоізоляційний шар; 4 – опори;

5 – конструкції, що огорожують камеру

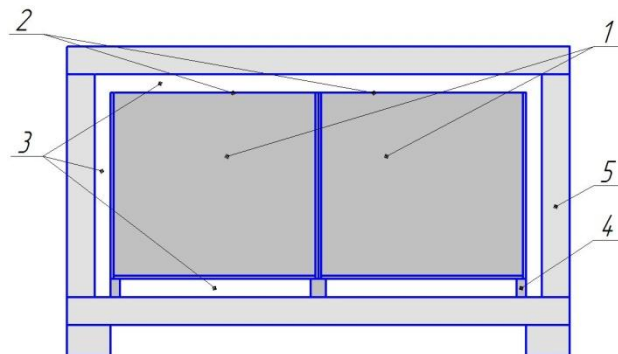


Рис. А.2. Схема 2 лабораторної камери:

1 – форми з тверднучим бетоном; 2 – гідроізоляційний матеріал;

3 – повітряні прошарки; 4 – опори; 5 – конструкції, що огорожують камеру

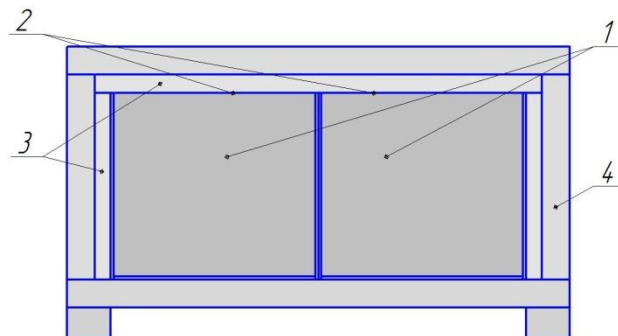


Рис. А.3. Схема 3 лабораторної камери:

1 – форми з тверднучим бетоном; 2 – гідроізоляційний матеріал;

3 – додатковий теплоізоляційний шар; 4 – конструкції, що огорожують камеру

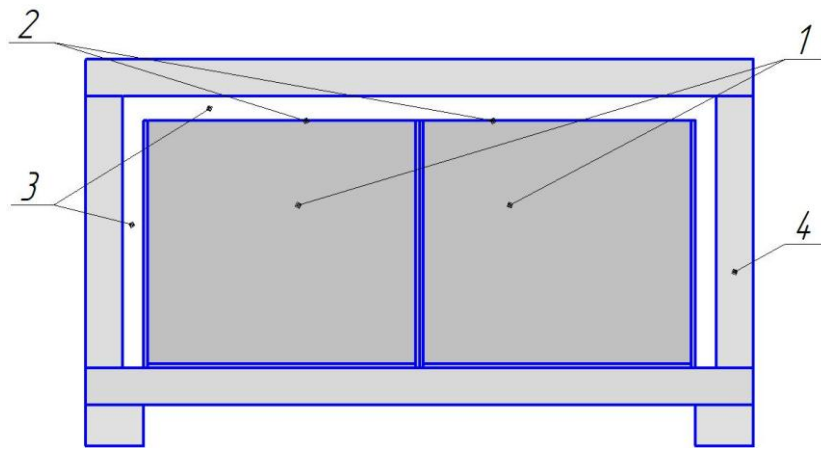


Рис. А.4. Схема 4 лабораторної камери

1 – форми з тверднучим бетоном; 2 – гідроізоляційний матеріал;
3 – повітряні прошарки; 4 – конструкції, що огороджують камеру

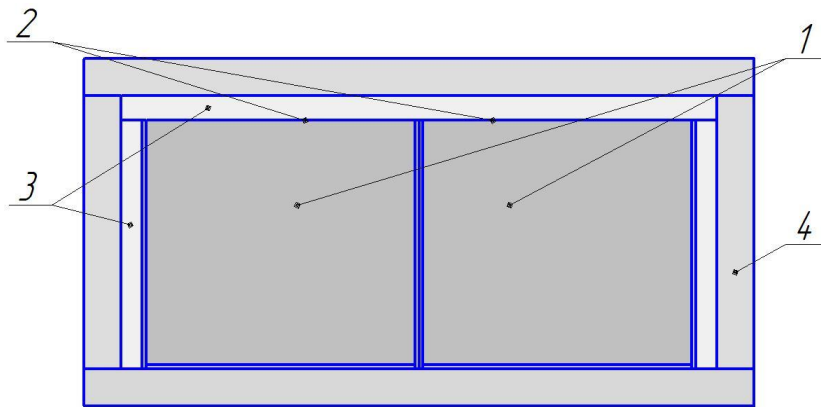


Рис. А.5. Схема 5 лабораторної камери:

1 – форми з тверднучим бетоном; 2 – гідроізоляційний матеріал;
3 – додатковий теплоізоляційний шар; 4 – конструкції, що огороджують камеру

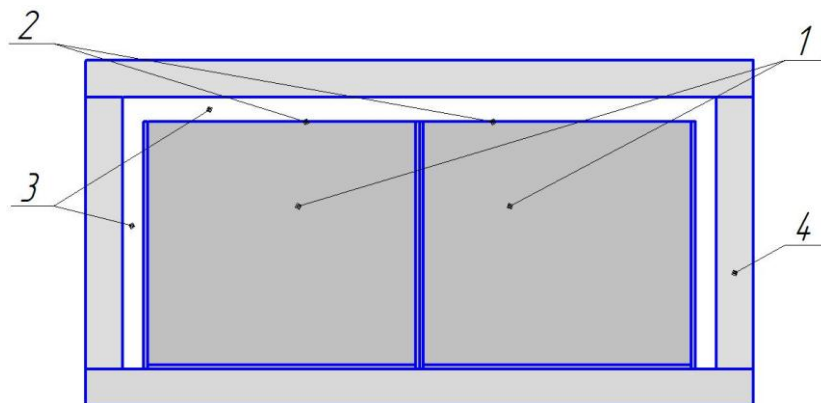


Рис. А.6. Схема 6 лабораторної камери

1 – форми з тверднучим бетоном; 2 – гідроізоляційний матеріал;
3 – повітряні прошарки; 4 – конструкції, що огороджують камеру

ДОДАТОК Б

Розрахункові схеми плоских колекторів сонячної енергії

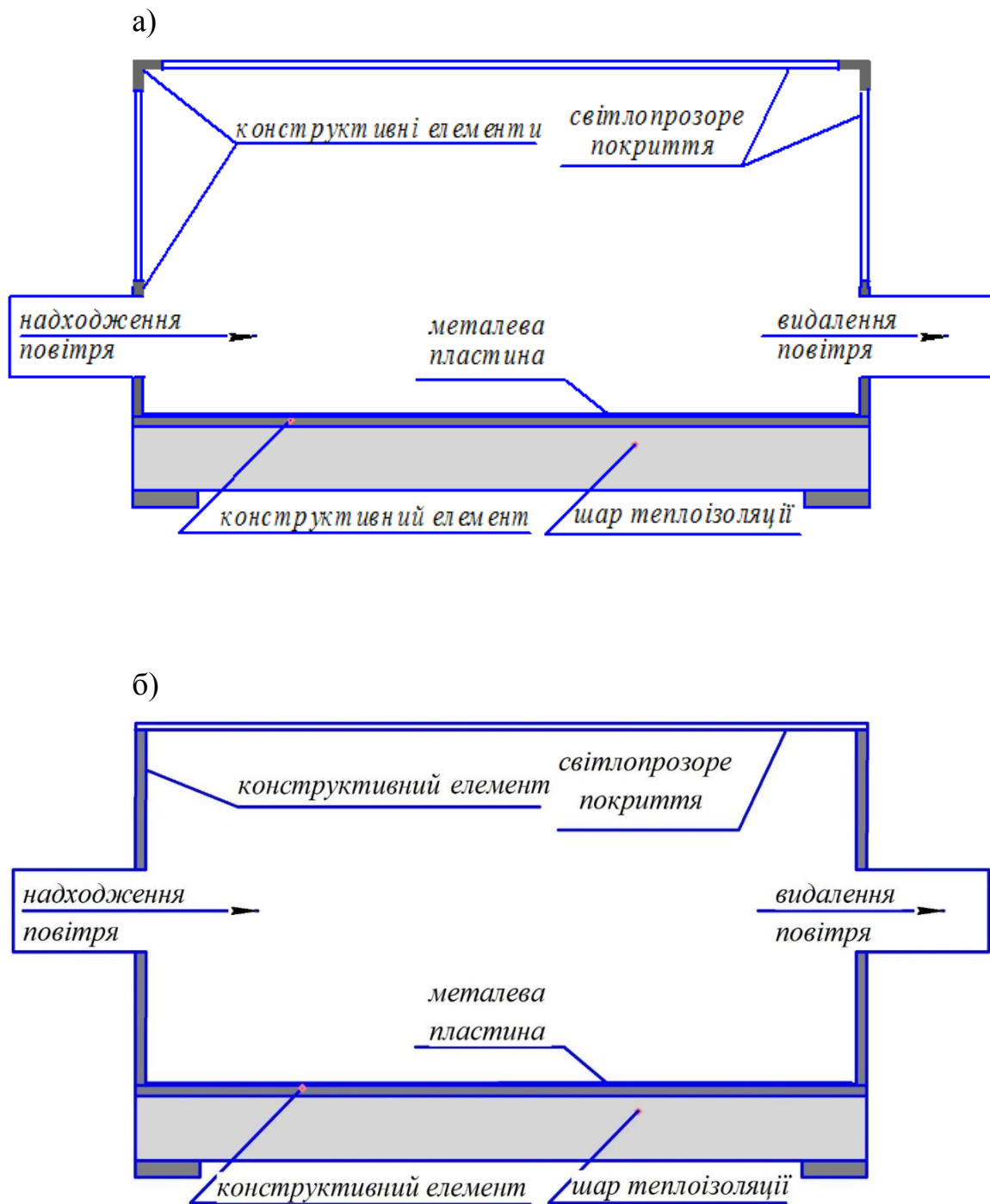


Рис. Б.1. Схема 1 плоского колектора сонячної енергії (два варіанти)

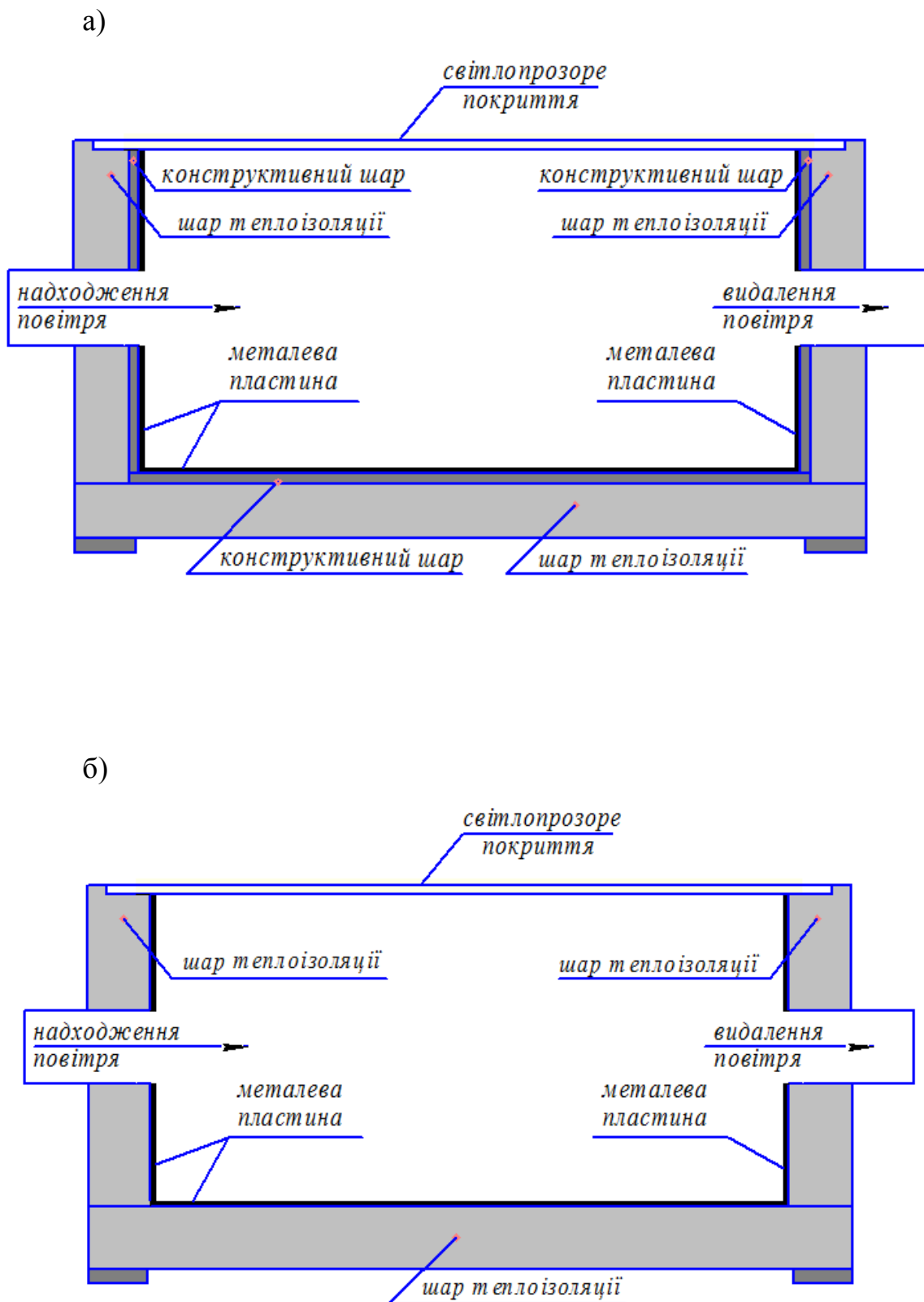


Рис. Б.2. Схема 2 плоского колектора сонячної енергії (два варіанти)

ДОДАТОК В

Розрахункові схеми теплових камер

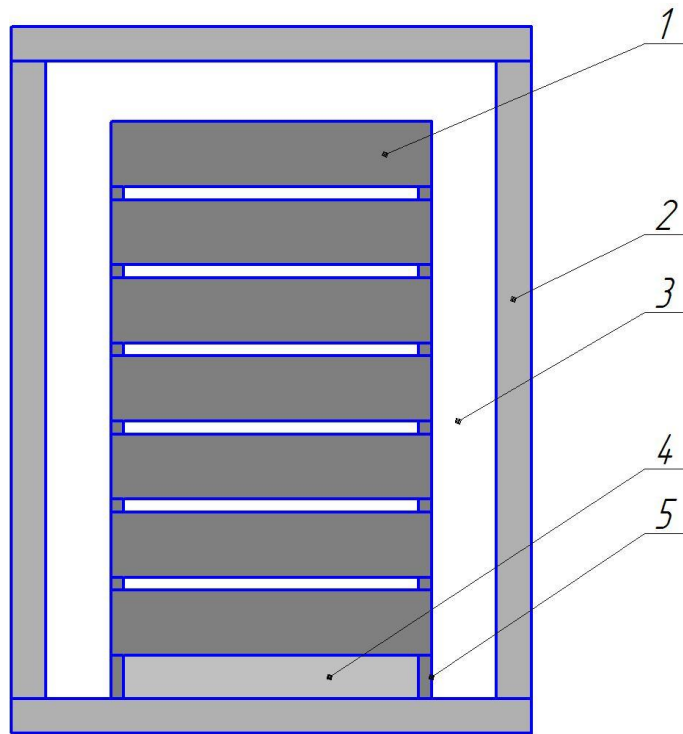


Рис. В.1. Схема (спрощена) теплової камери № 1:

- 1 – тверднучий у формі бетонний (залізобетонний) виріб;
- 2 – конструкції, що огороджують камеру;
- 3 – повітряний прошарок;
- 4 – шар теплоізоляції нижньої форми;
- 5 – опори

а)



б)



Рис. В.2. Схеми фрагментів теплової камери № 1

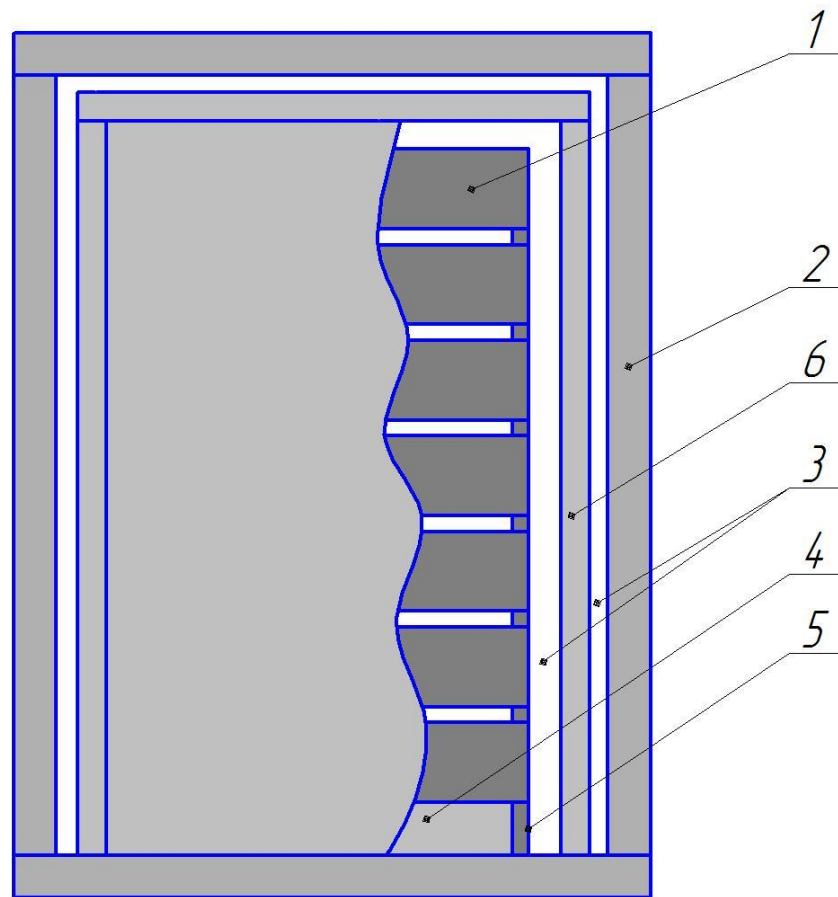


Рис. В.3. Схема (спрощена) теплової камери № 2:

- 1 – тверднучий у формі бетонний (залізобетонний) виріб;
- 2 – конструкції, що огороджують камеру;
- 3 – повітряні прошарки;
- 4 – шар теплоізоляції нижньої форми;
- 5 – опори;
- 6 – стінка теплоізоляційної конструкції

а)



б)



Рис. В.4. Схеми фрагментів теплової камери № 2

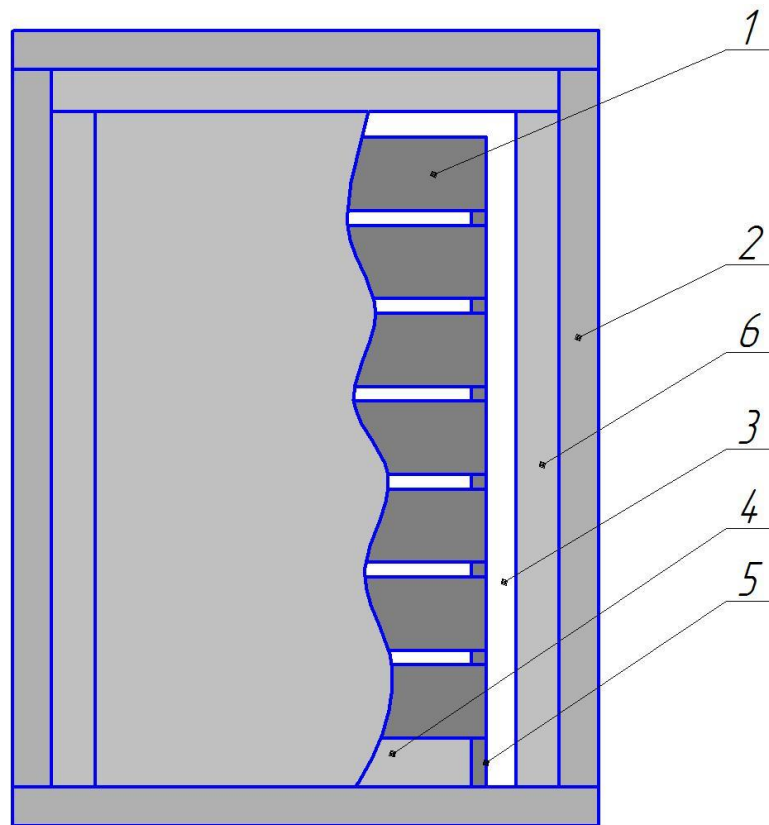


Рис. В.5. Схема (спрощена) теплової камери № 3:

- 1 – тверднучий у формі бетонний (залізобетонний) виріб;
- 2 – конструкції, що огороджують камеру;
- 3 – повітряний прошарок;
- 4 – шар теплоізоляції нижньої форми;
- 5 – опори;
- 6 – стінка теплоізоляційної конструкції

а)



б)



Рис. В.6. Схеми фрагментів теплової камери № 3