

УДК 694.328

С.В. Мінка, О.Л. Вишневецький

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків

## ШЛЯХИ ЗНИЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ ЗАЛІЗОБЕТОНУ ПРИ БУДІВНИЦТВІ ВІЙСЬКОВИХ ІНЖЕНЕРНИХ ОБ'ЄКТІВ

В роботі досліджені можливості суттєвого зниження температури теплової обробки залізобетону при будівництві військових інженерних об'єктів за рахунок зв'язку кінетики тепловиділення цементу з часом прикладення теплового впливу. Зниження енерговитрат при тепловій обробці залізобетону найбільш актуально при будівництві військових інженерних об'єктів у районах надзвичайних ситуацій мирного та військового часу, особливо при зниженні температури повітря нижче  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , відсутності якісних заповнювачів, використанні цементів зі значною долею мінеральних добавок та при застосуванні литих бетонних сумішей. Встановлено, що в залежності від етапів структуроутворення цементу, які спостерігаються на основі досліджень кінетики його тепловиділення, тепла обробка цементно-водних систем здатна сприяти, з одного боку, формуванню міцної та однорідної структури цементного каменю, з другого – відтворенню дефектів, що знижують його фізико-механічні властивості. Використання теплового режиму, що розраховується по результатах попередньо дослідженого зразку цементу, дозволяє водночас зменшити температуру теплової обробки будівельних конструкцій та підвищити міцність цементного каменю, визначаючого подальші фізико-механічні властивості залізобетону.

**Ключові слова:** тепла обробка залізобетону, енергозберігаючий режим теплової обробки залізобетону, тепловиділення цементу, кінетика структуроутворення цементу, міцність цементного каменю на стиск.

### Вступ

Питання отримання міцного та довговічного залізобетону при будівництві військових інженерних об'єктів за мінімально можливий час залишається у центрі уваги вчених багатьох країн. Вирішити цю задачу можна за допомогою теплової обробки залізобетону. Головною проблемою при цьому залишається питання вибору найбільш короткого та економічного режиму прогріву залізобетону. Взагалі режиму прогріву складається з:

- часу попереднього витримування до прогріву;
- часу та швидкості підйому температури до заданого значення;
- часу прогріву при заданій температурі (ізотермічної витримки);
- часу охолодження до температури навколишнього середовища.

В даній роботі розглянутий вплив на міцність цементного каменю часу попереднього витримування до прогріву. Інші складові теплової обробки залізобетону витримувались однаковими.

Зниження енерговитрат при тепловій обробці залізобетону найбільш актуально при будівництві військових інженерних об'єктів у районах надзвичайних ситуацій мирного та військового часу, особливо при зниженні температури повітря нижче  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , відсутності якісних заповнювачів, використанні цементів зі значною долею мінеральних домішок та при застосуванні литих бетонних сумішей.

Доведено [3, 5 – 7], одним з шляхів зниження енерговитрат при тепловій обробці залізобетону є врахування особливостей структуроутворення конкретного цементу. Етапи структуроутворення цементу

визначаються на основі досліджень кінетики його тепловиділення [3 – 6]. Внаслідок цього, вибір найбільш економічного режиму прогріву при тепловій обробці залізобетону з урахуванням особливостей конкретного цементу ефективно здійснювати, досліджуючи кількість енергії, яка виділяється у ході реакції цементу та води [4 – 6].

Для дослідження тепловиділення цементу у процесі гідратації, використовують калориметри різної конструкції. Сучасні ізотермічні мікрокалориметри дозволяють врахувати енергію хімічних реакцій гідратації цементу та дослідити зміни його кінетики структуроутворення на протязі тривалого часу. Нажаль, прецизійні ізотермічні мікрокалориметри мають високу вартість, при експлуатації потребують особливих заходів (відсутності коливань як температури навколишнього середовища так і напруги в електричній мережі, тривалого часу підготовки проб цементу, спеціального тривалого навчання персоналу та ін.). Тому їх досить складно використовувати на діючих будівельних майданчиках і вони здатні працювати лише в стаціонарних наукових центрах.

З іншого боку, кінетика тепловиділення та технологічні властивості цементу постійно змінюються за рахунок введення суперпластифікаторів, мікронаповнювачів та ін., ускладнюючи вибір енергозберігаючого режиму теплової обробки залізобетону. Підсумовуючи вищевказане, можна зробити висновок, що для контролю кінетики тепловиділення цементу необхідні калориметри, які можна використовувати в умовах діючих підприємств або строймайданчиків. Їх повинна відрізняти відносна простота конструкції, можливість дослідження одночасно

декількох проб цементу, невелика вартість, швидкість підготовки проб цементу.

**Мета статті:** визначити можливість зниження температури теплової обробки залізобетону за рахунок досліджень взаємозв'язку кінетики тепловиділення цементу з часом прикладення теплового впливу.

### Результати досліджень

Дослідження властивостей цементу при різних теплових режимах прогріву проводились на зразках – кубиках цементного тіста розміром 20\*20\*20 мм, виготовлених з цементу ПЦ-ІІІ-200. Водоцементне відношення в усіх серіях зразків складало 0,3. Цемент змішували з водою на протязі 5 хв. та віброуцільнювали 1 хв.

Зразки цементного тіста були вибрані об'єктом досліджень тому, що пісок та щебінь у складі бетону значно збільшують кількість факторів, що впливають на формування структури цементного каменю. У свою чергу, структура цементного каменю

визначає подальші фізико-механічні властивості залізобетону.

Нагрівання зразків цементного тіста здійснювалось за режимами, вказаними у табл. 1. Для усіх досліджуваних зразків підйом температури з 20 °С до розрахункової здійснювався на протязі однієї години. Час ізотермічного прогріву складав 4 години, термін охолодження до температури 20 °С складав одну годину. Зразки першої серії прогрівались при температурі ізотермічного прогріву 90 °С, та відрізнялися між собою часом попереднього витримування, який змінювався від 0,5 до 24 год. (табл. 1). Цей час попереднього витримування відраховувався від початку змішування цементу та води. Друга серія зразків прогрівалася за аналогічним режимом, але при температурі 60 °С. Через 24 години твердіння досліджувалась міцність на стиск 12 зразків для кожного режиму твердіння. Отримані результати випробування, оброблені за допомогою математичної статистики, наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Залежність міцності на стиск цементного тіста від режиму теплової обробки

№	Етап структуроутворення	Режим теплової обробки цементного тіста, год.	Прогрів при $t_{из} = 90^{\circ}C$			Прогрів при $t_{из} = 60^{\circ}C$		
			Міцність при стиску через 24 год.		Процент від міцності у віці 28 діб, %	Міцність при стиску через 24 год.		Процент від міцності у віці 28 діб, %
			Середнє значення $R_1$ , МПа	Половина довірчого інтервалу $\Delta_1$ , МПа		Середнє значення $R_2$ , МПа	Половина довірчого інтервалу $\Delta_2$ , МПа	
1	II	0,5+1+4+1	9,68	0,83	48,9	8,10	0,38	40,9
2		2+1+4+1	12,69	0,68	64,1	10,48	0,41	52,9
3	III	4+1+4+1	14,32	1,93	72,3	11,57	0,31	58,43
4		6+1+4+1	17,23	1,31	87,0	15,75	0,39	79,5
5		8+1+4+1	17,10	0,84	86,4	16,21	0,46	81,9
6		10+1+4+1	19,15	0,65	96,7	16,82	0,35	84,9
7		12+1+4+1	16,55	0,44	83,6	16,37	0,44	82,7
8	IV	24+1+4+1	11,61	0,34	58,6	10,67	0,24	53,9

Крім цього, була виготовлена окрема група з 12 зразків, яка знаходилась 28 діб при температурі 20 °С, без теплової обробки. Середня міцність таких зразків у віці 28 діб складала 19,8 МПа.

Дослідження тепловиділення цементно-водних систем дозволяє розділити процес структуроутворення на чотири етапи [1, 3, 5, 6].

Для контролю тривалості етапів структуроутворення цементу використовували калориметр, вимоги до конструкції якого надані в ГОСТ 310.5-80 «Цементы. Методы определения теплоты гидратации».

Оскільки для досліджень використовували переносний калориметр, здатний працювати в умовах підприємства або будівельного майданчика, перемішування цементу та води здійснювалось не в калориметрі. Тому теплота змочування цементу при первинному контакті з водою не вимірювалась, а спостереження тепловиділення та структуроутворення починалось через 10 хв. після змішування цементу та

води, що відповідає початку другого етапу структуроутворення [1 – 6]. Після перемішування та ущільнення цементного тіста, їм заповнювали пластиковий стаканчик, який встановлювали у калориметр. Внаслідок особливостей даного способу вимірювання, тепловиділення та начало спостереження структуроутворення починалось через 10 хв. Після змішування цементу та води, що відповідає початку другого етапу структуроутворення [1 – 6].

Методика визначення інтегрального тепловиділення досліджуваного цементу містить наступні етапи:

- зважування води, цементу, пластмасового стаканчику з точністю до 0,01 г;
- перемішування цементу та води протягом 5 хв.;
- ущільнення цементного тіста протягом 2 хв.;
- заповнення пластмасового стаканчику цементним тістом;
- встановлення на дно скляного термосу попередньо зваженого пінопластового диску, для запо-

бігання контакту пластмасового стаканчику з цементним тістом, зі скляними стінками термосу;

- встановлення на пінопластовий диск пластмасового стаканчику з цементним тістом накритого попередньо зваженою металеву пластинкою, що контактує з поверхнею цементного тіста;

- встановлення на металеву пластину термодатчика, який здатний вказувати температуру з точністю 0,1 °С, та його фіксація за допомогою клейкої стрічки;

- закриття термосу корковою пробкою;
- герметизація зазорів між корковою пробкою та краями термоса;

- температура повітря навколо термосу підтримується рівною температурі зразка цементного тіста, що знаходиться у термосі;

- температура цементного тіста вимірювалась кожні 30 хв. Перші данні температури зразка цементного тіста були отримані через 10 хв. з моменту перемішування цементу та води ;

- далі виконувався розрахунок інтегрального тепловиділення цементу.

Початок третього етапу структуроутворення визначався за даними досліджень зміни температури зразка цементного тіста. Результати досліджень кінетики тепловиділення цементу представлені на рис. 1. Завдяки конструкції калориметра та методиці проведення досліду, твердіння досліджуваного зразка цементу проходило в адіабатичних умовах.

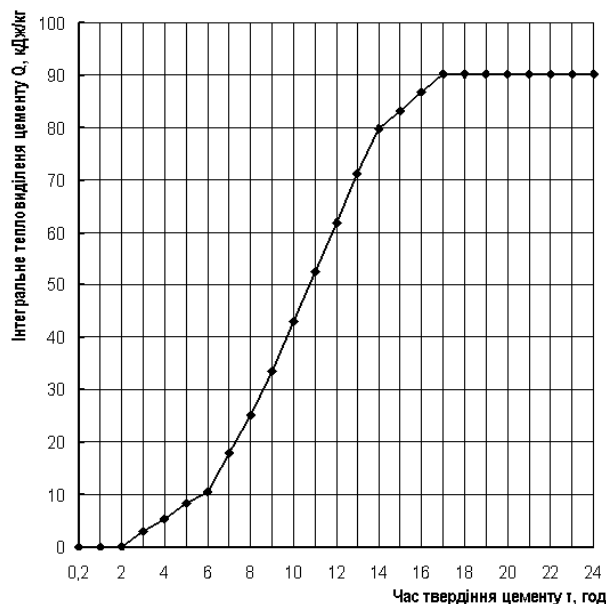


Рис. 1. Кінетика зміни інтегрального тепловиділення цементу ПЦ-III-200 в адіабатичному калориметрі

Розрахунок інтегрального тепловиділення цементу дозволяв точно визначити час закінчення другого та початок третього етапу структуроутворення цементу. Далі за рахунок саморозігріву досліджуваного зразка цементу в адіабатичних умовах швидкість структуроутворення цементу підвищувалась. Тому час закінчення третього етапу та початок чет-

вертого етапу структуроутворення цементу фіксувався раніше, ніж в зразках, які б знаходились у весь час при постійній температурі. Незважаючи на це, такий спосіб дозволяє визначати час початку теплової обробки, який є найбільш сприятливим для формування структури цементного каменю.

На першому етапі структуроутворення цементу мають місце наступні явища :

- 1) інтенсивна гідратація, взаємодія води з поверхнею частинок в'язучого;

- 2) зростання величини електропровідності і рН цементного тіста;

- 3) вихід продуктів реакції на поверхню частинок в'язучого та у об'єм рідкої фази.

Дані робіт [1, 3, 5] свідчать, що коагуляційна дисперсна структура утворюється відразу після змішування цементного порошку з водою.

Поява гідратів на поверхні частинок цементу, коли екранується електричне поле частинок, а знов виниклі гідрати не в змозі забезпечити міцні зв'язки, призводить до послаблення взаємодії між частинками цементу. Частинки цементу з оболонками, які представлені полімерними гідратними новоутвореннями, утворюють первинну колоїдну структуру. Усі ці процеси супроводжуються незначним тепловиділенням і найбільшим ущільненням системи, про яке можна судити по значній величині контракції [3]. В утвореній колоїдній структурі, окрім коагуляційних контактів, зумовлених молекулярними силами тяжіння, беруть участь також водневі зв'язки і інші взаємодії електричної природи. В названих процесах велику роль грають структурні особливості адсорбованої і зв'язаної води. На першому етапі структуроутворення цементно-водна система найбільш сприйнятлива до зовнішніх управляючих дій, наприклад, вібрування. Тривалість першого етапу структуроутворення цементу залежить від багатьох факторів, та може складати від 1 до 10 хв. [1, 3, 5]. В наших дослідах цей етап не досліджувався. Наше дослідження починалось через 10 хв. з моменту перемішування цементу та води, що відповідає початку другого етапу структуроутворення.

Початок другого етапу структуроутворення цементно-водної системи характеризується уповільненням процесів гідратації [1, 3, 5]. Незначне тепловиділення і уповільнення зростання електропровідності в другій стадії [1, 3, 5] пов'язують з появою навкруги зерен в'язучого оболонок з продуктів гідратації, які перешкоджають подальшому надходженню води до непрогідратованих ділянок на поверхні частинок цементу. У нашому досліді другий етап структуроутворення цементно-водної системи закінчився через 2 год. після змішування цементу та води (рис. 1).

Нагрів досліджуваних зразків до температури 50 – 90 °С на першому і другому етапах структуроутворення цементу, згідно [1 – 3], призводить до зниження їх міцності на стиск після 14, 28 та 60 діб твердіння, у порівнянні із зразками, що твердіють при 20 –

30 °С. Механізм зниження міцності бетону на другому етапі структуроутворення пов'язаний, перш за все, з значним розширенням об'єму утягненого до бетонної суміші повітря та вільної води на етапі підйому температури при теплової обробці бетону [1, 2, 3]. Внаслідок цього формується підвищена пористість структури бетону, яка негативно впливає на подальшу міцність та довговічність будівельних виробів.

У нашому досліді тепловий вплив наприкінці другого етапу структуроутворення, через 2 год. після змішування з водою (рис. 1), забезпечив отримання при 90 °С – 64,1%, та при 60 °С – 52,9% від марочної міцності (табл. 1). Це свідчить, що теплова обробка залізобетону на другому етапі структуроутворення цементного каменю є неефективною.

Третій етап – утворення просторового каркаса кристалізаційної структури – у нашому досліді почався через 2 год. після змішування цементу з водою (рис. 1).

При проведенні експерименту за рахунок саморозігріву досліджуваного зразка цементу в адіабатичних умовах швидкість структуроутворення цементу підвищувалась. Тому час закінчення третього етапу та початок четвертого етапу структуроутворення цементу (через 17 год.), в нашому випадку фіксувався раніше, ніж в зразках, які б знаходились увесь час при постійній температурі 20 °С.

Вважається [1, 3, 5], що на третьому етапі інтенсивно йдуть процеси структуроутворення та гідратації, про що свідчить зростання інтегрального тепловиділення цементного тіста (рис. 1).

Згідно з дослідженнями [1, 3, 5] на даному етапі контакти між частинками в колоїдній структурі на близькій відстані розвиваються в конденсаційні та кристалізаційні, значно зростає ступінь гідратації в'язучого. Утворення каркаса конденсаційно-кристалізаційної структури супроводжується зростанням швидкості тепловиділення, яке досягає максимуму в кінці цього етапу.

Розглянемо результати нагріву зразків цементного тіста до температури 60 – 90 °С на третьому етапі структуроутворення. Згідно [4, 5], нагрів на цьому етапі більш сприятливий для підвищення міцності на стиск, ніж підігрів на першому або другому етапах, хоча механізм цих особливостей гідратації цементу ще повністю не з'ясовано.

У першій серії зразків (температура підігріву 90 °С) при зростанні часу попереднього витримування перед нагрівом, міцність на стиск спочатку зростала від 14,32 МПа до 19,15 МПа, а потім спадала до 16,55 МПа. Максимальна міцність дорівнювала 96,7% марочної міцності і була досягнута при початку нагріву через 10 годин від початку змішування цементу та води. Збільшення часу попередньої витримки зверх оптимальної, як свідчать дані (табл. 1) призводить до неефективного використання теплової енергії, тому що знижує міцність при стиску через 2 год. від оптимальної на 13%, а через 14 год. – на 38%.

У другій серії зразків (температура підігріву 60 °С) при зростанні часу попереднього витримування перед нагрівом, міцність на стиск також спочатку зростала від 11,57 МПа до 16,82 МПа, а потім спадала до 16,37 МПа. Максимальна міцність дорівнювала 84,9% марочної міцності і була досягнута при початку нагріву через 10 годин від початку змішування цементу та води.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що для цементу є оптимальний час прикладення теплового впливу. Цей час забезпечує максимальне зміцнення цементного каменю при найбільш раціональному використанні теплової енергії. Аналогічні результати були отримані раніше і для інших цементів [4, 5, 8]. Цей оптимальний час можна точно визначити в умовах виробництва за допомогою даних о кінетиці тепловиділення цементу.

Дані табл. 1 свідчать, що вибір оптимального режиму 10+1+4+1 год. та температура нагріву 60 °С, забезпечує отримання міцності цементного каменю 84,9%, у той час, як неоптимальні режими теплової обробки та температура нагріву 90 °С, забезпечують отримання міцності цементного каменю від 48,9% до 86,4%. Таким чином, дослідження на третьому етапі структуроутворення цементу за допомогою термокінетичного аналізу дозволяє знайти оптимальний режим прогріву будівельних виробів при 60 °С та суттєво (на 30 °С) знизити температуру їх теплової обробки, одержуючи 85% марочної міцності при стиску.

Теплова обробка залізобетону на третьому етапі структуроутворення цементу, згідно [3, 5] призводить до формування більш міцної конденсаційно-кристалізаційної структури цементно-водної системи. Значна частина вільної води на третьому етапі стає хімічно або фізично зв'язаною продуктами гідратації. Каркас конденсаційно-кристалізаційної структури, що утворюється на третьому етапі структуроутворення цементу, більш міцний, ніж той, що формується на першому та другому етапах. Він сприяє меншим деформаціям, пов'язаним із значним розширенням об'єму утягненого до бетонної суміші повітря. Внаслідок цього, зменшується загальна пористість та внутрішні деструкції готових виробів з бетону [3, 5, 8].

На четвертій стадії спостерігається основне підвищення міцності і уповільнення швидкості тепловиділення зразків цементного тіста. Відбувається зростання міцності за рахунок гелевидної структури гідросилікатів [3, 5, 8]. На цьому етапі відбувається розвиток гідратних новоутворень усередині основного кристалізаційного каркаса із створенням напруг, внаслідок яких іноді спостерігаються деструктивні явища у вигляді спадів міцності [4].

Нагрів зразків цементу на четвертому етапі структуроутворення до температури 50 – 90 °С, згідно наших досліджень [5], призводить до зниження їх міцності на стиск, у порівнянні із зразками, підігрів яких здійснювався на протязі третього етапу, але більш ніж у зразків підігрів яких проводили на пер-

шому або другому етапах структуроутворення.

Дані табл. 1 свідчать, що при нагріві зразків на четвертому етапі структуроутворення їх міцність:

- при температурі 90 °С та режимі нагріву 24+1+4+1 год. на 38% менша, ніж міцність зразків при режимі 10+1+4+1 год.;

- при температурі 60 °С та режимі нагріву 24+1+4+1 год., на 31% менша, ніж міцність зразків при режимі 10+1+4+1 год.

Отримані дані, які свідчать про зниження міцності зразків цементу на четвертому етапі структуроутворення при їх нагріві до температури 50 – 90 °С, підтверджуються дослідями німецьких вчених [8]. Вони пов'язують це з так званим «повторним утворенням етtringиту». Внаслідок руйнування кристалів етtringиту при їх нагріві до температури 50 – 90 °С, в структурі цементного каменю виникають дефекти, які призводять до зниження його міцності та довговічності. Механізм цього явища потребує додаткових досліджень.

### Висновок

1. Режим теплової обробки, визначений за результатами спостережень та вивчення кінетики структуроутворення цементу, дозволяє зменшити з 90 °С до 60 °С температуру нагріву залізобетону, без суттєвого зниження його фізико-механічних властивостей. Користування таким режимом теплової обробки в умовах надзвичайних ситуацій мирного та військового часу при будівництві військових інженерних об'єктів дає можливість отримання максимально міцного та довговічного залізобетону за мінімально можливий час.

2. За результатами спостережень та вивчення кінетики структуроутворення цементу можна знайти час попередньої витримки цементу при теплової обробці, який дає максимум міцності цементного каменю при стиску. Для досліджуваного цементу він досягається через 8 годин від початку третього етапу структуроутворення. Зміна часу попередньої витримки досліджуваних зразків перед тепловою обробкою змінює їх міцність на 44 – 48%.

3. Для вибору енергозберігаючих режимів теплової обробки залізобетону в умовах виробництва можна застосувати адіабатичний калориметр, вимоги до конструкції якого надані в ГОСТ 310.5-80 «Цементы. Методы определения теплоты гидратации». Це дозволяє проводити спостереження та вивчення кінетики структуроутворення цементу в умовах заводських лабораторій.

4. Необхідні подальші дослідження механізмів гідратації цементно-водних систем, які могли б пояснити процеси формування оптимальної структури цементного каменю під впливом підвищення температур.

### Список літератури

1. Полак А.Ф. Твердение мономинеральных вяжущих веществ / А.Ф. Полак. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1966. – 230 с.
2. Михайлов А.Ф. Исследование влияния воды затворения на структуру и физико-механические свойства бетона: автореф. дисс....канд. техн. наук / А.Ф. Михайлов. – Х., 1978. – 22 с.
3. Гранковский И.Г. Структурообразование в минеральных вяжущих системах / И.Г. Гранковский. – К.: Наукова думка, 1984. – 297 с.
4. Мінка С.В. Энергосберегающая технология сборного железобетона на основе использования тепловыделения вяжущего: автореф. дисс....канд. техн. наук / С.В. Мінка. – Х., 1986. – 24 с.
5. Ушеров-Маршак А.В. Калориметрия цемента и бетона / А.В. Ушеров-Маршак. Х.: Факт, 2002. – 183 с.
6. К оцeнке совместимости химических добавок с цемен-тами в технологии бетона / А.В. Ушеров-Маршак и др. //Строительные материалы и изделия. – 2003. – № 4. – С. 11-15.
7. Мінка С.В. Шляхи зниження енерговитрат у технології збірного залізобетону / С.В. Мінка, О.Л. Вишневецький // Науковий вісник будівництва. – Х.: ХДТУБА, 2009. – Вип. 53. – С. 298-304.
8. Штарк И. Долговечность бетона / И. Штарк, Б. Вихт; пер. с нем. А. Тулаганова; под ред. П. Кривенко. – К.: Оранта, 2004. – 301 с.

Надійшла до редколегії 3.12.2009

**Рецензент:** канд. техн. наук, доц. М.М. Свириденко, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків.

### ПУТИ СНИЖЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ВОЕННЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ

С.В. Минка, О.Л. Вишневецкий

*В работе исследованы возможности существенного снижения температуры тепловой обработки железобетона при строительстве военных инженерных объектов за счет связи кинетики тепловыделения цемента со временем приложения теплового воздействия.*

**Ключевые слова:** тепловая обработка железобетона, энергосберегающий режим тепловой обработки железобетона, тепловыделение цемента, кинетика структурообразования цемента, прочность цементного камня при сжатии.

### WAYS OF TEMPERATURE REDUCTION OF THERMAL PROCESSING OF FERRO-CONCRETE AT CONSTRUCTION OF MILITARY ENGINEERING OBJECTS

S.V. Minka, A.L. Vyshnevetskiy

*The opportunities of essential temperature reduction of thermal processing of ferro-concrete are investigated at construction of military engineering objects due to connection kinetics of thermal emissions of cement with time of application of thermal influence.*

**Keywords:** thermal processing of ferro-concrete, energy-saving regime of thermal processing of ferro-concrete, thermal emission of cement, kinetics of structurization of cement, strength of a cement stone at compression.