

## ABSTRACT

Dmytriev M.M., Papchenko O.M., Derkachov O.B., Rutkovska IA Informative signs for construction algorithm thermograms airport surfaces. / Mykola Dmytriev, Oleg Papchenko, Oleg Derkachov, Inessa Rutkovska // Management of projects, systems analysis and logistics. – K.: NTU – 2012. – Vol 10.

There is written out in this report the reasons of the inadequate sight of airfield surface's thermo gram when their thermal diagnostics. There is shown the necessity of system approach which takes into attention all factors influencing on thermo gram formation to make correct technical diagnosis. The principles of working out of the thermo gram's analysis algorithm are recommended.

The aim of the article is to identify informative features construction algorithm thermograms airport surfaces.

Object - thermograms airport surfaces.

Thermal control of airport surfaces based on the use of heat fluxes arising from their thickness due to the difference relatively constant temperature of the soil under the cover and changing daily and seasonal temperatures on its surface while taking into account effects of solar radiation, wind and dirt from. Thus, in the afternoon, when the temperature rises to the surface and operates solar radiation, heat flow is directed from the surface of the soil, and at night - on the contrary.

KEY WORDS: THERMOGRAMS, AIRPORT SURFACES, THERMAL FIELD, INFORMATIVE FEATURES, ALGORITHMS.

## РЕФЕРАТ

Дмитриев М.М., Папченко О.М., Деркачов О.Б., Рутковская И.А. Информативные признаки для построения алгоритма термограмм аэродромных покрытий. / Николай Николаевич Дмитриев, Олег Михайлович Папченко, Олег Борисович Деркачов, Инесса Анатольевна Рутковская // Управление проектами, системный анализ и логистика. - М.: НГУ - 2012. - Вып. 10.

Изложены причины, по которым по внешнему виду термограммы теплового поля поверхности аэродромного покрытия нельзя делать однозначных выводов относительно наличия и локализации скрытых дефектов. Показано, что для правильной оценки необходим системный подход, который принимал бы во внимание все факторы, которые действуют на формирование термограммы. Рекомендуются принципы разработки алгоритма анализа термограмм.

Целью статьи является определение информативных признаков построения алгоритма термограмм аэродромных покрытий.

Объект - термограммы аэродромных покрытий.

Тепловой контроль аэродромных покрытий основано на использовании тепловых потоков, возникающих в их толще за счет разницы относительно постоянных температур почвы под покрытием и изменения суточных и сезонных температур на его поверхности при учете воздействия солнечной радиации, ветра и грунтовых вод. Таким образом, в дневное время, когда температура воздуха повышается, и на поверхность действует солнечная радиация, тепловой поток направлен от поверхности до грунта, а ночью - наоборот.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ТЕРМОГРАММЫ, АЭРОДРОМНЫХ ПОКРЫТИЙ, ТЕПЛОВОЕ ПОЛЕ, ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ, АЛГОРИТМ.

УДК 666.972.165

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДОБАВКИ ТНХК НА ВЛАСТИВОСТІ БЕТОНУ

Дорошенко Ю.М. кандидат технічних наук

Дорошенко О.Ю. кандидат технічних наук

Осіпчук М.Б.

Розвиток сучасної будівельної індустрії вказує на необхідність управління фізико-хімічними процесами твердіння бетону з метою інтенсифікації будівельних робіт, поліпшення технічних властивостей і зниження собівартості виробів. Рішення цієї задачі досягається введенням в бетонну суміш хімічних добавок - прискорювачів твердіння [1, 2]. Проте аналіз застосування існуючих добавок цього класу показує, що їм властиві деякі недоліки, пов'язані з корозією арматури, недобором марочної міцності бетоном, високою вартістю і дефіцитністю.

В результаті широкого пошуку була розроблена, досліджена і пройшла виробничу перевірку комплексна добавка ТНХК, яка складається з двох компонентів - тіосульфату натрію  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  і хлориду кальцію  $\text{CaCl}_2$  [3]. Добавка ТНХК позбавлена вищеперелічених недоліків, сприяє прискоренню твердіння бетонної суміші в ранньому віці, збільшує марочну міцність бетону. При призначенні складових добавки ТНХК враховувалося, що  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  - розповсюджений хімічний продукт, недорогий, широко вживаний в промисловості, а  $\text{CaCl}_2$  - багатотонажний відхід содового і хлорного виробництва.

Синтез цих двох солей заснований на наступній передумові. Перший компонент добавки є ефективним прискорювачем твердіння, не викликаючи при цьому скорочення термінів тужавлення цементу, а також чинить інгібірувальну дію на арматуру, але в той же час дещо знижує 28 добову міцність в'язучого. Другий компонент прискорює твердіння і підвищує марочну міцність, але скорочує терміни тужавлення і викликає депасивацію сталевий арматури. Таким чином, обидва компоненти в комплексній добавці взаємно доповнюють один одного.

Методом ортогонального центрального композиційного планування була визначена оптимальна витрата добавки в бетонній суміші. Залежно від мінералогічного складу, виду цементу і водоцементного відношення оптимум ТНХК знаходиться в межах 0,4-0,7%  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  + 0,4-0,6%  $\text{CaCl}_2$  від маси цементу. При такій кількості добавки вдалося максимально посилити позитивний ефект кожного компонента і повністю виключити небажані прояви.

Експериментальні роботи проводилися з товарними портланд-цементами марки 500 Здолбуновського ЦШК і Кам'янець-Подільського заводу (вміст  $\text{C}_3\text{A}$  відповідно до 7,5 і 7,0%). Досліджувався бетон наступного складу Ц : П : Щ = 1 : 1,64 : 3,56 при В/Ц = 0,44 (витрата цементу - 350 кг/м<sup>3</sup>). Зразки 10X10X10 см. формувалися на стандартному вібромайданчику. Твердіння здійснювалося в природних умовах при  $18 \pm 2^\circ\text{C}$ , а також при тепловолігій обробці по режимах 3+3+6+2 години при  $80^\circ\text{C}$ , 4 + 3+13 + 3 години при  $70^\circ\text{C}$  і 3 + 2 + 8 + 3 години при  $70^\circ\text{C}$ .

Результати експериментів (табл. 1) свідчать про те, що бетон з добавкою ТНХК в усі терміни твердіння має міцність вище за еталон (бездобавочного складу). Кінетика зростання міцності показує, що максимальний ефект у разі природного твердіння досягається у віці до трьох діб. При наступному твердінні приріст міцності в бетоні з добавкою стабілізується і до 28 діб складає 112-116% міцності бездобавочного бетону.

Характер дії добавки на зростання міцності пропареного бетону подібний до дії на бетон природного твердіння, але, в цьому випадку, сильніше виражений. Так, відпускна міцність бетону з ТНХК перевищує еталон на 22-29% і складає близько 90% 28-добової міцності контрольних зразків.

Такий характер поведінки добавки ТНХК свідчить про її переважний вплив на управління саме початковими фізико-хімічними процесами гідратації в'язучого, формуванням його кристалізаційної структури. Введення добавки у водоцементну систему викликає структуризацію рідкої фази системи, орієнтування диполів  $\text{H}_2\text{O}$ , підвищення щільності ненасичених Н-зв'язків в координаційних сферах іонів. У цих умовах добавка ТНХК сприяє підвищенню енергії контактів твердої і рідкої фаз і як наслідок, інтенсивнішому розчиненню останньої.

Можна припустити наступний механізм такого процесу. Взаємодія оболонок гідратів іонів, що мають підвищену щільність ненасичених Н-зв'язків, з поверхнею цементних кристалів і встановлення з іонами водневих зв'язків енергетично полегшує наступну дисоціацію і адсорбцію молекул води на поверхні в'язучого. Такий процес істотно знижує енергію іонного зв'язку в ґратах цементних мінералів і забезпечує інтенсивніший відрив як окремих іонів, так і іонних пар з переходженням їх в об'єм рідкої фази.

Ці результати підтверджуються рентенофазовим і дифференціально-термічним аналізами дії добавки ТНХК, що дозволили встановити, що її присутність у водоцементній дисперсії створює принципово інші умови гідратації і розчинення в'язучого, кристалізації новоутворень і формування структур цементного каменю. Добавка активує процеси розчинення клінкерних мінералів і сприяє повнішій гідратації цементу. При цьому кристалізація новоутворень переміщується у бік збільшення кількості низькоосновних гідросилікатів кальцію, підвищення дисперсності нових фаз.

Важливим питанням застосування добавок в бетоні є універсальність їх дії на різні види клінкерного в'язучого. Дослідження показали (табл. 1), що добавка ТНХК позитивно впливає на обидва види цементу, але в цілому ефективніша при використанні в'язучого Здолбунівського ЦШК, ніж Кам'янець-Подільського заводу, що пов'язано з відмінністю в хіміко-мінералогічному складі клінкерів.

У зв'язку з тим, що до складу добавки ТНХК входить хлорвмісна сіль -  $\text{CaCl}_2$ , яка агресивна по відношенню до сталевий арматури, важливим було вивчення корозійного процесу в бетоні. Для

проведення випробувань в бетонні зразки вище вказаного складу закладалися арматурні стержні з гладкого дроту класу В - 1, діаметром 5 мм. З метою порівняння стержні закладалися в бетонні кубики з індивідуальною добавкою  $\text{CaCl}_2$ , узятого в еквівалентній (з добавкою ТНХК) кількості. Оцінка корозійної дії добавки на арматуру проводилась по зміні маси сталі і по глибині осередків корозії.

Таблиця 1. - Кінетика зростання міцності бетону з добавкою ТНХК

вид цементу	добавка	міцність зразків при стиску, МПа									
		нормальне твердіння				після ТВО					
		3+3+6+2		4+3+13+3		3+12+8+3					
1 доб.	3 доб.	7 діб	28 діб	1доб.	28 діб	1 доб	28 діб	1 доб	28 діб		
Здолбунівський	еталон	8,4	17,9	27,2	36,8	23,7	34,4	37,1	43,3	30,	38,5
	ТНХК	11,8	23,9	32,3	42,6	30,6	42,3	43,7	48,8	2	44,1
Кам'янець-Подільський	еталон	8,0	17,5	26,3	35,4	22,8	34,3	-	-	-	-
	ТНХК	10,9	22,6	30,7	39,6	27,9	40,9	-	-	-	-

В результаті випробувань встановлено (Рис. 1, 2), що у віці до 2-х років в усіх зразках бездобавочного бетону як нормального твердіння, так і після ТВО корозійні втрати незначні. Аналогічно дією на збереження арматури характеризується і досліджувана добавка ТНХК- Після 24 місяців випробувань арматурні стержні практично не були пошкоджені корозією. Кінетика вагових втрат і глибини ушкоджень стержнів в зразках з добавкою ідентична еталонним стержням. Слід зазначити, що процес корозії з однаковою інтенсивністю протікав протягом усього періоду випробувань, і в активності цього процесу не було відмічено періодів "сплеску" або "згасання". В цілому ж корозійні пошкодження сильніше виражені в бетоні, підданому тепловологій обробці.

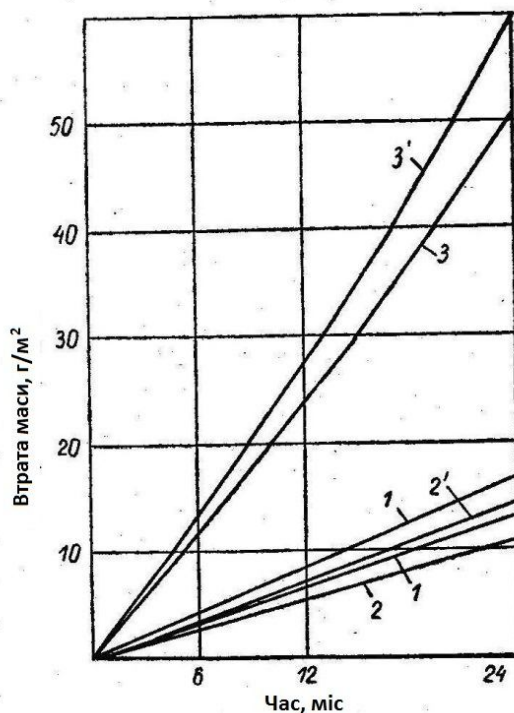


Рисунок 1. - Кінетика втрати маси сталевих арматурних стержнів  
 1 - без добавки; 2 - добавка ТНХК; 3 - добавка  $\text{CaCl}_2$  при нормальному твердінні;  
 1', 2', 3' - ті ж, після тепловологій обробки

Введення в бетон добавки хлориду кальцію викликало депасивацію арматури. Корозія стержнів виражена сильно, вагові втрати металу перевищують втрати еталонних стержнів і стержнів в зразках з ТНХК приблизно в 4 рази. Візуальний огляд виявив в усіх стержнях суцільну поверхневу корозію, а також значне число місць з точковою (язвеною) корозією.

Проведені дослідження дозволили зробити висновок, що застосування добавки ТНХК не викликає збільшення корозійних пошкоджень сталі у порівнянні з еталоном. Відсутність корозії пояснюється тим, що :

у оптимальних дозуваннях добавки ТНХК міститься незначна кількість хлор-іонів (до 0,4% від маси цементу), які повністю використовуються при утворенні малорозчинних гідрохлор- алюмінатів кальцію;

основним компонентом добавки є тіосульфат натрію, тобто сіль слабкої кислоти і сильної основи, тіосульфат-іон якої визначає лужну реакцію розчину добавки і в роботі [4] відмічений як активний інгібітор корозії;

присутність добавки ТНХК сприяє формуванню більше мікропористої структури цементного каменю, що забезпечує надійний захисний шар для Введення в бетон добавки хлориду кальцію викликало депасивацію арматури. Корозія стержнів виражена сильно, вагові втрати металу перевищують втрати еталонних стержнів і стержнів в зразках з ТНХК приблизно в 4 рази. Візуальний огляд виявив в усіх стержнях суцільну поверхневу корозію, а також значне число місць з точковою (язвеною) корозією.

Проведені дослідження дозволили зробити висновок, що застосування добавки ТНХК не викликає збільшення корозійних пошкоджень сталі у порівнянні з еталоном. Відсутність корозії пояснюється тим, що :

у оптимальних дозуваннях добавки ТНХК міститься незначна кількість хлор-іонів (до 0,4% від маси цементу), які повністю використовуються при утворенні малорозчинних гідрохлор- алюмінатів кальцію;

основним компонентом добавки є тіосульфат натрію, тобто сіль слабкої кислоти і сильної основи, тіосульфат-іон якої визначає лужну реакцію розчину добавки і в роботі [4] відмічений як активний інгібітор корозії;

присутність добавки ТНХК сприяє формуванню більше мікропористої структури цементного каменю, що забезпечує надійний захисний шар для арматури.

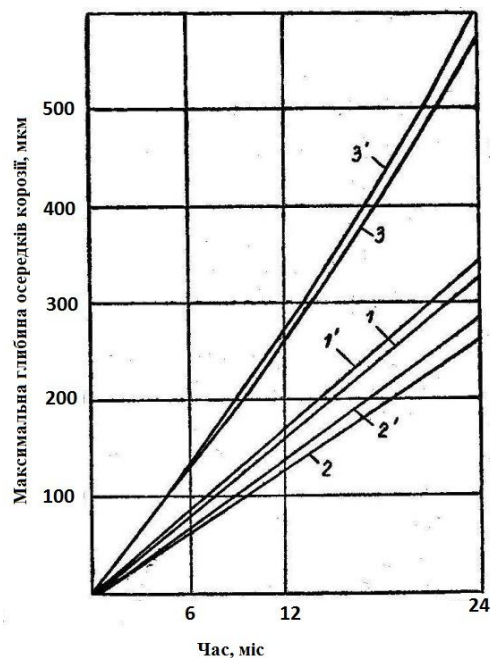


Рисунок 2. - Максимальна глибина осередків корозії.  
1 - без добавки; 2 - добавка ТНХК; 3 - добавка  $\text{CaCl}_2$  при нормальному твердінні;  
1', 2', 3' - ті ж, після теплової обробки

Таким чином, застосування добавки ТНХК в бетоні дозволяє прискорити темпи зведення

збірних і монолітних конструкцій і споруд, економити цемент і зменшити загальну вартість будівельних робіт. Так, наприклад, використання добавки в монолітному висотному будівництві з вертикальною ковзаючою опалубкою дозволило майже в 2 рази прискорити термін розпалубки зовнішніх стін і інших конструкцій.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Сычев М.М. Некоторые вопросы активации адгезии вяжущих систем.— Журнал прикладной химии, 60, 1987, №5, с. 982—993.
2. Сычев М.М. Проблемные вопросы гидратации и твердения цементов.— Цемент, 1986, № 9, с. 11—14.
3. Вяжущее для бетонной и растворной смесей.— А. с. № 1231029, БИ № 16, 1986.
4. Мураками Х., Танака Х. Влияние тиосульфата кальция на ускорение гидратации портландцемента и сравнение с другими растворимыми неорганическими солями.— В кн.: Пятый Международный конгресс по химии цемента.— М.: Стройиздат, 1973, с. 242—243.

#### РЕФЕРАТ

Дорошенко Ю.М., Дорошенко О.Ю., Осіпчук М.Б. Дослідження впливу добавки ТНХК на властивості бетону. / Юрій Михайлович Дорошенко, Олександра Юріївна Дорошенко, Михайло Борисович Осіпчук // Управління проектами, системний аналіз і логістика. — К.: НТУ — 2012. — Вип. 10.

В статті розглядається вплив добавки ТНХК на властивості бетону. Методом ортогонального центрального композиційного планування була визначена оптимальна витрата добавки в бетонній суміші. Залежно від мінералогічного складу, виду цементу і водоцементного відношення оптимум ТНХК знаходиться в межах 0,4-0,7%  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  + 0,4-0,6%  $\text{CaCl}_2$  від маси цементу. При такій кількості добавки вдалося максимально посилити позитивний ефект кожного компонента і повністю виключити небажані прояви.

Результати експериментів свідчать про те, що бетон з добавкою ТНХК в усі терміни твердіння має міцність вище за еталон (бездобавочного складу). Кінетика зростання міцності показує, що максимальний ефект у разі природного твердіння досягається у віці до трьох діб. При наступному твердінні приріст міцності в бетоні з добавкою стабілізується і до 28 діб складає 112-116% міцності бездобавочного бетону.

Характер дії добавки на зростання міцності пропареного бетону подібний до дії на бетон природного твердіння, але, в цьому випадку, сильніше виражений. Так, відпускна міцність бетону з ТНХК перевищує еталон на 22-29% і складає близько 90% 28-добової міцності контрольних зразків.

Можна припустити наступний механізм такого процесу. Взаємодія оболонок гідратів іонів, що мають підвищену щільність ненасичених Н-зв'язків, з поверхнею цементних кристалів і встановлення з іонами водневих зв'язків енергетично полегшує наступну дисоціацію і адсорбцію молекул води на поверхні в'язучого. Такий процес істотно знижує енергію іонного зв'язку в ґратах цементних мінералів і забезпечує інтенсивніший відрив як окремих іонів, так і іонних пар з переходженням їх в об'єм рідкої фази.

У зв'язку з тим, що до складу добавки ТНХК входить хлорвмісна сіль -  $\text{CaCl}_2$ , яка агресивна по відношенню до сталеві арматури, важливим було вивчення корозійного процесу в бетоні. Для проведення випробувань в бетонні зразки вище вказаного складу закладалися арматурні стержні з гладкого дроту класу В - 1, діаметром 5 мм. З метою порівняння стержні закладалися в бетонні кубики з індивідуальною добавкою  $\text{CaCl}_2$ , узятого в еквівалентній (з добавкою ТНХК) кількості. Оцінка корозійної дії добавки на арматуру проводилась по зміні маси сталі і по глибині осередків корозії.

Ці результати підтверджуються рентенофазовим і диференціально-термічним аналізами дії добавки ТНХК, що дозволили встановити, що її присутність у водоцементній дисперсії створює принципово інші умови гідратації і розчинення в'язучого, кристалізації новоутворень і формування структур цементного каменю. Добавка активує процеси розчинення клінкерних мінералів і сприяє повнішій гідратації цементу. При цьому кристалізація новоутворень переміщується у бік збільшення кількості низькоосновних гідросилікатів кальцію, підвищення дисперсності нових фаз.

Застосування добавки ТНХК в бетоні дозволяє прискорити темпи зведення збірних і монолітних конструкцій і споруд, економити цемент і зменшити загальну вартість будівництва.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ЦЕМЕНТОБЕТОН, ВЛАСТИВОСТІ, ХІМІЧНА ДОБАВКА, ТВЕРДІННЯ.

## ABSTRACT

Doroenko Y.M, Doroshenko O.Y., Osipchuk M.B. The influence of additives on the properties of concrete TNHK. / Yuri Doroshenko, Olexandra Doroshenko, Mykhaylo Osipchuk // Management of project, systems analysis and logistics. - K.: NTU - 2012. - Vol. 10.

The paper examines the influence of additives on the properties of concrete TNHK. The method of orthogonal central composite plan was defined optimum fuel additive in concrete mixtures. Depending on the mineralogical composition, type of cement and vodotse-mentnoho optimum ratio TNHK within 0,4-0,7%  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  + 0.4-0.6% by weight of cement  $\text{CaCl}_2$ . With so many supplements could maximize the positive effects of each component and completely eliminate undesirable.

The experimental results indicate that the concrete with the addition TNHK in all terms of hardening has strength above the benchmark (Cement with no membership). Kinetics of growth of strength shows that the maximum effect in the event of natural curing is achieved in under three days. The next hardening increment in concrete strength with the addition of stabilized and up to 28 days is 112-116% Cement with no strength concrete.

The nature of additives to increase the strength of concrete steamed like effect on the natural curing concrete, but in this case, more pronounced. Yes, selling strength concrete TNHK exceed standard on 22-29% and is about 90% 28-day strength of the control specimens.

We can assume the following mechanism of this process. Interaction shells hydrates ions with high density of unsaturated H-bonds with the surface of the cement crystals and installation of ions hydrogen bond energy facilitates subsequent adsorption and dissociation of water molecules on the surface of the binder. This process significantly reduces the energy of ionic bonds in the lattice of cement minerals and provides intensive separation of individual ions and ion pairs of upgrading of their volume in liquid phase.

Due to the fact that the composition of additives TNHK is chlorinated salt -  $\text{CaCl}_2$  that aggressive against steel bars, it was important to study the corrosion process in concrete. For testing of concrete samples of the above mentioned laying reinforcing rods with smooth wire Class B - 1, 5 mm in diameter. To compare rods laid in concrete cubes with individual additive  $\text{CaCl}_2$ , taken in equivalent (with the addition TNHK) number. Evaluation of corrosion additive for reinforcement performed by changing the mass of steel and depth of corrosion cells.

These results are confirmed renhenofazovym and dyfferentsialno-thermal analysis of additives TNHK that revealed that its presence in water-cement dispersion creates a fundamentally different conditions of hydration and dissolution of binder, crystallization and formation of tumors cement structures. The additive activates the processes of dissolution of clinker minerals and promotes fuller hydration of cement. This crystallization neoplasms moves toward increasing the number nizkoosnovnyh hydro calcium, increased dispersion of new phases.

Application TNHK additives in concrete to speed up the pace of construction of prefabricated and monolithic structures and buildings, save cement and reduce the total cost of construction.

KEYWORDS: CEMENT-CONCRETE, PROPERTIES, CHEMICAL ADDITIVES, CURING.

## РЕФЕРАТ

Дорошенко Ю.М., Дорошенко А.Ю., Осипчук М.Б. Исследование влияния добавки ТНХК на свойства бетона. / Юрий Михайлович Дорошенко, Александра Юрьевна, Михаил Борисович Осипчук // Управление проектами, системный анализ и логистика. - М.: НТУ - 2012. - Вып. 10.

В статье рассматривается влияние добавки ТНХК на свойства бетона. Методом ортогонального центрального композиционного планирования был определён оптимальный расход добавки в бетонной смеси. В зависимости от минералогического состава, вида цемента и водоцементного отношения оптимум ТНХК находится в пределах 0,4-0,7%  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  + 0,4-0,6%  $\text{CaCl}_2$  от массы цемента. При таком количестве добавки удалось максимально усилить положительный эффект каждого компонента и полностью исключить нежелательные проявления.

Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что бетон с добавкой ТНХК во все сроки твердения имеет прочность выше эталонной (бездобавочного состава). Кинетика роста прочности показывает, что максимальный эффект при естественном твердении достигается в возрасте до трех суток. При следующем твердении прирост прочности в бетоне с добавкой стабилизируется и до 28 суток составляет 112-116% прочности бездобавочного бетона.

Характер действия добавки на рост прочности пропаренного бетона подобен действию на бетон естественного твердения, но, в этом случае, сильнее выражен. Так, отпускная прочность бетона

с ТНХК превышает эталон на 22-29% и составляет около 90% 28-суточной прочности контрольных образцов.

Можно предположить следующий механизм такого процесса. Взаимодействие оболочек гидратов ионов, имеющих повышенную плотность ненасыщенных Н-связей, с поверхностью цементных кристаллов и установления с ионами водородных связей энергетически облегчает последующую диссоциацию и адсорбцию молекул воды на поверхности вяжущего. Такой процесс существенно снижает энергию ионной связи в решетке цементных минералов и обеспечивает интенсивный отрыв как отдельных ионов, так и ионных пар с переходом их в объем жидкой фазы.

В связи с тем, что в состав добавки ТНХК входит хлорсодержащая соль -  $\text{CaCl}_2$ , которая агрессивна по отношению к стальной арматуре, важным было изучение коррозионного процесса в бетоне. Для проведения испытаний в бетонные образцы вышеуказанного состава закладывались арматурные стержни гладкой проволоки класса В - 1, диаметром 5 мм. С целью сравнения стержни закладывались в бетонные кубики с индивидуальной добавкой  $\text{CaCl}_2$ , взятого в эквивалентном (с добавкой ТНХК) количестве. Оценка коррозионного воздействия добавки на арматуру проводилась по изменению массы стали и по глубине очагов коррозии.

Эти результаты подтверждаются рентгенофазовым и дифференциальных-термическим анализами действия добавки ТНХК, позволившие установить, что ее присутствие в водоцементной дисперсии создает принципиально иные условия гидратации и растворения вяжущего, кристаллизации новообразований и формирования структур цементного камня. Добавка активизирует процессы растворения клинкерных минералов и способствует более полной гидратации цемента. При этом кристаллизация новообразований перемещается в сторону увеличения количества низкоосновных гидросиликатов кальция, повышение дисперсности новых фаз.

Применение добавки ТНХК в бетоне позволяет ускорить темпы возведения сборных и монолитных конструкций и сооружений, экономить цемент и уменьшить общую стоимость строительства.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ЦЕМЕНТОБЕТОН, СВОЙСТВА, ХИМИЧЕСКАЯ ДОБАВКА, ТВЕРДЕНИЕ.

УДК 625.7/.8:338

## ГЕНЕТИЧНИЙ АЛГОРИТМ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОГРАМ РЕМОНТУ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

Канін О.П., кандидат технічних наук  
Ігнатюк В.В.

Постановка проблеми. Сучасний стан дорожнього одягу автомобільних доріг України та його покриття на багатьох ділянках не відповідає нормативним вимогам за показниками міцності, рівності та зчеплення. За умов недостатнього фінансування привести стан дорожнього одягу до нормативного рівня можливо лише за певну кількість років. Приймаючи до уваги наявність великої кількості альтернативних варіантів стратегій дорожньо-ремонтних робіт – послідовності капітальних і поточних дрібних та середніх ремонтів дорожнього одягу, необхідна розробка ефективного підходу для порівняння цих варіантів і вибору найкращого з них, що являє собою складну наукову задачу, розв'язання якої може забезпечити процедури обґрунтування довгострокових програм ремонтів дорожніх одягів ефективним практичним інструментарієм.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблему пошуку ефективної стратегії реалізації довгострокової програми ремонту дорожніх одягів корисно розглядати з позицій теорії управління проектами та програмами, орієнтуючись на досягнення найкращих результатів, можливих в рамках обмеженого фінансування, шляхом застосування сучасних методів моделювання і пошуку оптимальних рішень [1,2].

Значна увага дослідників приділена застосуванню в оптимізації програм управління станом доріг генетичних алгоритмів (ГА) [3,4,5,6]. Ідея генетичних алгоритмів запозичена у живої природи і використовує в своїй основі теорію еволюції Дарвіна. Алгоритм полягає в організації еволюційного процесу, кінцевою метою якого є отримання оптимального рішення в складній комбінаторній задачі. Вперше подібний алгоритм був запропонований в 1975 році Джоном Холландом в Мічиганському університеті. На сьогоднішній день генетичні алгоритми довели свою ефективність при вирішенні

багатьох NP-складних задач і особливо в практичному використанні, де математичні моделі мають складну структуру і застосування стандартних градієнтних методів, динамічного або лінійного програмування вкрай утруднено.

Проте, розглянуті моделі оптимізації програм ремонту дорожнього одягу не відповідають умовам експлуатації доріг в Україні та моделям прогнозування стану дорожнього одягу, тому не можуть бути використані без переосмислювання і адаптації.

Постановка завдання. Сформулювати задачу оптимізації програми дорожньо-ремонтних робіт для досягнення заданого стану дорожнього одягу на мережі доріг за задану кількість років.

Виклад основного матеріалу. Проблему довготривалої оптимізації можна сформулювати як багатовимірну задачу дискретної оптимізації [1,2].

Для пошуку оптимального рішення задачі можна застосувати генетичний алгоритм [3-6] з детермінованими моделями деградації дорожнього одягу (за міцністю, рівністю та зчепленням), які використовуються в СУСП.

У підходах до управління програмою ремонту дорожніх одягів на основі ГА кожне рішення одночасно для всіх ділянок доріг (секцій) виражається як послідовність по секціям і в плановому періоді різних ремонтних заходів, яка називається хромосомою. Кожний захід або позиція в хромосомі – це ген, який може приймати значення тільки з допустимої області. Ген – це значення керованого параметру задачі оптимізації. Множина можливих рішень – хромосом являє собою так звану популяцію. ГА розглядає послідовність популяцій рішень. Пошук найкращого рішення супроводжується конструюванням нової популяції рішень з попередньої за допомогою операторів кросоверу (схрещування) і мутації. В кросовері для двох кандидатів рішень-хромосом (представлених як рядки генів двох хромосом) з заданою вірогідністю визначається точка розриву хромосом, і вони обмінюються частинами своїх генів, формуючи таким чином дві нові хромосоми (рис. 1).

Нові хромосоми – «нащадки» представляють два нових рішення і потенційно мають характеристики двох «батьків». Потім з заданою вірогідністю здійснюється мутація генів нових хромосом, що обумовлює перехід до нового регіону простору пошуку. Нові хромосоми оцінюються обчисленням функції цілі – функції пристосування. Краще значення функції визначає більші шанси цих хромосом взяти участь в наступному раунді операцій кросоверу і мутації.

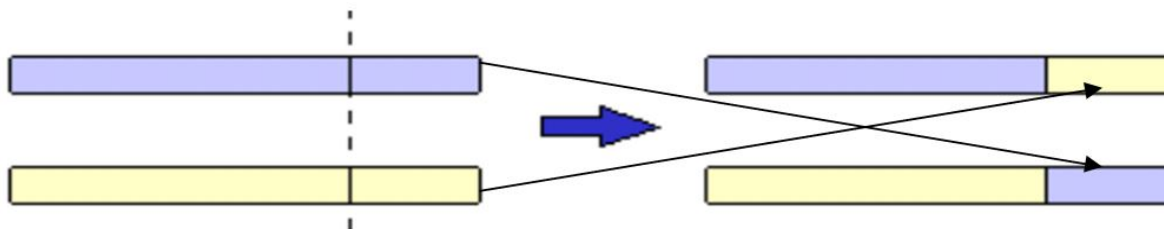


Рисунок 1. - Умовна схема схрещування (кросоверу або рекомбінації)

ГА добре працюють в оптимізаційних задачах, що не мають обмежень, тому всі нові рішення-хромосоми допустимі. Проте, реальні задачі, подібні для управління станом дорожнього одягу, мають багато обмежень, які формують область допустимих рішень, наприклад, технологічних або ресурсних. Обмеження являють значну проблему способу, яким ГА генерує нових кандидатів рішень. Процеси кросоверу і мутації не повинні продукувати нові хромосоми, які порушують обмеження задачі [3].

Нами пропонується виконувати операції кросоверу і мутації з урахуванням таких передумов:

- 1) початкова популяція стратегій генерується у відповідності зі ступенем деградації секцій доріг;
- 2) кожного року виконується тільки один вид ремонту;
- 3) поточний середній ремонт і капітальний ремонт виконуються не частіше одного разу за певну кількість років;
- 4) в операції кросоверу дві батьківські хромосоми обмінюються розділеними частинами і породжується два «нащадки». Праві їх частини повинні перевірятись на допустимість. Якщо послідовність ремонтних заходів не допустима, то праві частини потрібно регенерувати;
- 5) в операції мутації ген замінюється на інший в кожній ділянці хромосоми: після того, як випадковим чином вибраний ген, що буде мутувати, ліва від цього гена частина хромосоми



залишається незмінною як частина нової хромосоми, ген змінюються в залежності від ступеню деградації минулого (попереднього) року, а права частина хромосоми від позиції мутації верифікується тим же самим методом, що встановлений в операторі кросоверу.

Остання передумова означає, що в розглядуваному випадку немає потреби в двійковому кодуванні генів, так як нове його значення зразу змінюється на нове в залежності від наведених передумов.

В табл. 1 наведено структуру ділянки хромосоми, яка моделює  $i$ -ту секцію дорожнього одягу, і схему рекомбінації генів. Позначка  $\text{HC}$  в таблиці означає недопустимість поточного середнього ремонту через рік після капітального ремонту покриття.

В таблиці прийняті такі скорочення: ПД – поточний дрібний ремонт, ПС – поточний середній ремонт, КП – капітальний ремонт покриття, КО – капітальний ремонт покриття і основи дорожнього одягу.

Таблиця 1. – Схема рекомбінації (кросоверу) хромосом

Секція	$i$				
ділянка хромосоми, відповідна секції $i$ - «батьки» (покоління $t$ )					
Захід	ПС	ПД	ПД	ПД	ПС
Ген	1	2	3	4	5
Захід	ПД	ПД	КП	ПД	ПД
Ген	1	2	3	4	5
«нащадки» (покоління $t+1$ )					
Захід	ПС	ПД	ПД	ПД	ПД
Ген	1	2	3	4	5
Захід	ПД	ПД	КП	ПД	HC ПД
Ген	1	2	3	4	5
точка розділення хромосом →					

Конкретизуємо функцію пристосування  $F$  або цільову функцію таким чином, щоб вона враховувала деградацію дорожнього одягу, вартість ремонтів та бюджетні обмеження. Функція пристосування  $F$  являє собою штрафну функцію, яка залежить від планованого стану дорожнього одягу і перевищення бюджету.

$$F = C \times \left[ 1 + p_1 \times \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \left( \frac{k_i^H - k(i, t)}{k_i^H} + \frac{s(i, t) - s_i^H}{s_i^H} + \frac{ch_i^H - ch(i, t)}{ch_i^H} \right) + p_2 \times \frac{C - B}{B} \right], \quad (1)$$

де  $k_i^H$  - мінімально допустимий (нормативний) коефіцієнт запасу міцності для  $i$ -ї секції дорожнього одягу;

$k(i, t)$  - фактичний коефіцієнт запасу міцності на кінець року  $t$ ;

$s_i^H$  - максимально допустимий показник рівності покриття;

$s(i, t)$  - фактичне значення показника рівності на кінець року  $t$ ;

$ch_i^H$  - мінімально допустиме значення коефіцієнту зчеплення покриття ;

$ch(i, t)$  - фактичний коефіцієнт зчеплення на кінець року  $t$ ;

$B$  - бюджет ремонту на весь плановий період  $T$ ;

$p_1$  - коефіцієнт значущості секції (наприклад, значення і категорії дороги, інтенсивності руху, тощо);

$p_2$  - коефіцієнти значимості ступеню виконання бюджету,  $p_2 = 1,0$ .

$$\frac{k_i^H - k(i, t)}{k_i^H} = 0, \frac{s(i, t) - s_i^H}{s_i^H} = 0, \frac{ch_i^H - ch(i, t)}{ch_i^H} = 0, \text{ якщо мають від'ємне значення.}$$

Моделі деградації (криві деградації) для показників міцності, рівності або зчеплення апроксимується ламаною лінією з ділянками, які мають постійні річні швидкості деградації:

$$D(t) = D(0) + \sum_{j=1}^t \mu \times R(A_j, Tr_j) - \sum_{j=1}^t I_m(j), \quad (2)$$

де  $D(t)$  - ступінь деградації наприкінці року  $t$ ;  
 $D(0)$  - ступінь деградації на початок планового періоду;  
 $\mu$  - фактор, що відображує деградаційні якості матеріалу покриття дорожнього одягу;  
 $R(A_j, Tr_j)$  - річна швидкість деградації в рік  $j$ ;  
 $A_j$  - вік дорожнього одягу в рік  $j$  - кількість років від спорудження або останнього капітального ремонту до року  $j$ ;  
 $Tr_j$  - коефіцієнт руху в рік  $j$  - співвідношення прогнозованої на рік  $j$  максимальної інтенсивності руху і проектної інтенсивності руху;  
 $I_m(j)$  - вплив заходу  $m$  на рівень деградації в рік  $j$ .  
 Повна вартість ремонтних заходів, що планується на період часу  $T$ :

$$C = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \left[ (1+r)^{-t} \prod_{t=1}^{t=T} (1+i_{in}(t)) \times [c_m(i,t) + c_{tr}(i,t)] \times L(i) \times W(i) \right], \quad (3)$$

де  $N$  - кількість секцій (ділянок) доріг;  
 $T$  - період часу, на який планується експлуатація;  
 $r$  - дисконтний коефіцієнт, який приймається постійним на період планування, який доцільно приймати за банківською відсотковою ставкою, наприклад, 0.16;  
 $i_{in}$  - темп інфляції;  
 $c_m(i,t)$  - одинична вартість заходу  $m$ , що застосовується до секції  $i$  в рік  $t$ , грн./м<sup>2</sup>;  
 $c_{tr}(i,t)$  - транспортні витрати, грн./м<sup>2</sup>;  
 $L(i)$  та  $W(i)$  - довжина та ширина покриття  $i$ -ї секції.

Стратегія експлуатації однієї секції складається з послідовності у часі річних заходів,  $m = \overline{1,4}$  ( $m = 1$  - поточний дрібний ремонт, 2- поточний середній ремонт, 3 - капітальний ремонт покриття, 4 - капітальний ремонт покриття і основи дорожнього одягу). Значення функції пристосування (1) визначається цією стратегією. Допустимі перестановки вектору  $m$  містять в собі таку (або такі), яка забезпечує мінімальне значення функції пристосування (1).

Узагальнена структура генетичного алгоритму:

Блок 1. Ініціалізація початкової популяції  $P^0$  чисельністю  $v$ .

1.1. Встановити номер поточного покоління  $t = 0$ .

1.2. Згенерувати випадковим чином хромосомний набір - популяцію з  $v$  хромосом.

1.3. Оцінити кожну хромосому популяції за допомогою функції пристосованості (1).

Блок 2. Відтворення нащадків із спадковими генетичними властивостями батьків.

2.1. Вибрати випадковим чином з поточної популяції  $P^t$  згідно зі схемою схрещування кодування двох батьків, що утворюють «шлюбну пару».

2.2. Згенерувати за допомогою оператора кросоверу для обраної «шлюбної пари» з імовірністю  $p_c$  нащадків, які успадковують генетичні властивості батьків.

2.3. Оцінити кожне кодування нащадків за допомогою функції пристосованості.

2.4. Повторювати п. 2.1 доти, поки не буде розглянуто задане число «шлюбних пар»  $N_c$ .

Блок 3. Створення мутантів з генетичними властивостями, відмінними від властивостей батьків.

3.1. Вибрати випадковим чином нащадків, що успадковують генетичні властивості батьків.

3.2. Згенерувати за допомогою оператора мутації з ймовірністю  $p_m$  кодування - мутанта.

3.3. Оцінити мутанта за допомогою функції пристосованості.

3.4. Повторювати всі операції з п. 3.1 доти, поки не буде отримано задане число мутантів  $N_m$ .

Блок 4. Заміна поточної популяції  $P^t$  новою популяцією  $P^{t+1}$