Відповідно до отриманих результатів можна стверджувати, що основним недоліком змішаних швидкотвердних в'яжучих є зменшення міцності після 7 діб тверднення, яке досягає 30% в місячному віці. Розчини ж на основі швидкотвердного безгіпсового портландцементу характеризуються стабільною динамікою наростання міцності, починаючи з перших годин і до 28 діб тверднення.

Отже, введення 10–30% глиноземистого цементу до звичайного портландцементу дає змогу пришвидшити терміни тужавіння суміші до значень, що відповідають технологічним вимогам до швидкотвердних СБС, надалі можливий недобір або навіть спад міцності таких виробів. Водночас для розробленого безгіпсового портландцементу з КХД характерне пришвидшене структуроутворення, починаючи з етапу тужавіння і протягом всього періоду гідратації.

Отже, використання модифікованих органомінеральними додатками безгіпсових портландцементів у швидкотвердних СБС є гідною альтернативою змішаним в'яжучим на звичайному та глиноземистому цементах, особливо в сухих сумішах, до яких ставляться підвищені вимоги за стійкістю до початкових навантажень (ремонтні склади, "експрес" клеї, суміші для влаштування наливних підлог).

Висновок. Дослідженнями встановлено, що введення до складу СБС безгіпсового портландцементу на противагу змішаному в'яжучому дає змогу отримати стабільну швидкотужавіючу швидкотвердну суміш. Це відкриває перспективи одержання нової групи СБС різного призначення для високопродуктивних технологій виробництва.

1. Сухие строительные смеси / Карапузов Е.К., Лутц Г., Герольд Х. и др. – К., 2000. 2. Левинский А.М. Сухие строительные смеси – высокое качество, надежность и долговечность покрытий // Строительные материалы и изделия. – 2001. – №4. – С. 33–34. 3. Саницкий М.А. Быстротвердеющие безгипсовые портландцементы с регулируемыми сроками схватывания: Аналитический обзор. – М., 1990. 4. Безгіпсовий портландцемент – швидкотвердне в'яжуче для інтенсивних технологій будівництва / Х.С. Соболь, Н.І. Петровська, С.Ю. Терлига, А.С. Дрималик // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2004. – № 497. – С. 137–140. 5. Early strength development and hydration of Ordinary Portland Cement/Calcium Aluminate Cement Pastes / Ping Gu, James J. Beaudoin, Edmond G. Quinn and Robert E. Myers // Advn Cem Mat. – 1997. – №6. – P. 53–58.

УДК 691.3

С.Й. Солодкий
Національний університет "Львівська політехніка"
кафедра автомобільних шляхів

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ У ТЕХНОЛОГІЇ БЕТОНІВ НА МАЛОКЛІНКЕРНИХ І БЕЗКЛІНКЕРНИХ В'ЯЖУЧИХ

© Солодкий С.Й., 2005

Досліджено активності композиційних і шлаколужних в'яжучих, а також показники міцності і деформативності бетонів на їхній основі. Наведено приклади розв'язання аналітико-геометричних задач на основі експериментально-статистичних моделей властивостей бетонів і бетонних сумішей.

The article is devoted to the researches of scientifics approach to designing the modified concretes on base of the composite and slagalkaline cements. The approach combines using of the advantages of the composite and slagalkaline cements and multifactor modelling that would provide specified properties and durability of concretes.

Вступ. Зростання обсягів дорожнього будівництва, тенденція застосування в дорожніх одягах шарів тільки із укріплених матеріалів, підвищення цін на портландцемент і паливно-енергетичні ресурси стимулюють розширення сировинної бази для виробництва в'яжучих і, передовсім,

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

неорганічного походження. У державному стандарті на цементи загальнобудівельного призначення ДСТУ Б. В.2.7–46–96 та в євростандарті EN 197 як окремий тип виділено композиційні цементи (КЦ), що відповідають вимогам часу. Вони повинні містити не менше від двох видів активних мінеральних додатків різної природи активності. Серед додатків гідравлічної дії об'єктивно поширеніший доменний гранульований шлак, із додатків пуцоланової групи значний інтерес становлять золи-виносу ТЕС і природні ефузивні породи. Змінюючи компонентний склад і застосовуючи модифікацію хімічними додатками, досягають високої активності і покращання будівельно-технічних властивостей таких цементів. Застосування безклінкерних шлаколужних в'яжучих (ШЛВ) дає змогу отримати показники активності, недосяжні для в'яжучих на основі портландцементного клінкеру.

Постановка проблеми. Властивості композиційних і шлаколужних в'яжучих на сучасному етапі досліджено у роботах вчених НДІВМ ім. В.Д. Глуховського, вагомий внесок в дослідження модифікованих композиційних в'яжучих зроблено вченими під керівництвом проф. М.А. Саницького. Проте властивості бетонів на основі композиційних в'яжучих вивчалися вибірково, як правило, з погляду застосування у промисловому та цивільному будівництві. Відомо, що до бетонів дорожнього призначення ставляться особливі вимоги відповідно до їхнього напружено-деформованого стану та умов експлуатації.

Загальна кількість технологічних чинників, які впливають на властивості бетонів, може бути дуже великою. Оскільки бетон в дорожньому будівництві застосовується як в монолітному варіанті, так і в збірному варіантах, то склад і структура бетону не є заданими і постійними. Виявлення наістотніших чинників та цілеспрямована дія на них для досягнення заданих властивостей бетонів або розв'язання задач оптимізації є неможливим без аналізу цієї системи на основі експериментально-статистичних моделей (ЕСМ). За допомогою експериментально-статистичного моделювання можна досліджувати та аналізувати визначені складні багатокомпонентні системи і на базі такого аналізу вишукувати рішення, яке у найкращий спосіб задовольняє висунуту мету.

Метою роботи є дослідження фізико-механічних властивостей малоклінкерних і без-клінкерних в'яжучих і бетонів на їхній основі, а також розв'язання аналітико-геометричних задач на основі ЕСМ, який полягає у побудові поверхонь відгуку показників міцності бетонів і реологічних характеристик бетонних сумішей.

Аналіз останніх досліджень. З позицій вирішення конкретних інженерних задач в технології бетону ефективними є ЕС-моделі, які кількісно поєднують рецептурно-технологічні параметри з показниками властивостей бетонів (В.А. Вознесенський, Л.Й. Дворкін, С.В. Коваль та інші). Розвиток методології та апарату ЕС-моделювання як елемента комп'ютерного матеріалознавства (В.А. Вознесенський, Т.А. Ляшенко) відкриває нові можливості дослідження та оптимізації багато-компонентних модифікованих матеріалів. Реалізація теоретичних основ модифікації цементних систем і методів комп'ютерного пошуку додатків поліфункціональної дії на базі ЕСМ дало змогу розробити ефективний науковий підхід до раціональної модифікації бетону (С.В. Коваль).

Методи досліджень. Фізико-механічні характеристики в'яжучих і бетонів визначали згідно з вимогами чинних ДСТУ.

Планування і реалізацію експерименту здійснювали на основі трифакторного трирівневого плану, близького до Д-оптимального. Для побудови регресивних залежностей та статистичної обробки експериментальних даних, отриманих на базі трифакторної тривимірної матриці планування, використана програма ***REGRESS*** [1].

Програму ***MatLab R12*** застосували для побудови поверхонь відгуку, які відображають характер варіації досліджуваної властивості бетонів залежно від вибраних факторів. Поверхню відгуку досліджуваної характеристики будують за отриманою регресивною залежністю при варіації двох вибраних факторів в межах визначеного факторного простору; інші фактори експерименту зафіксовують.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Результати досліджень. Спільною ознакою досліджуваних в'яжучих є наявність в їхньому складі доменного шлаку від 15 до 40 % в композиційних в'яжучих і 100% – в шлаколужних (табл. 1). Шлаколужні в'яжучі забезпечують стабільно високі показники міцності, особливо, на рідинному склі. В композиційних в'яжучих в міру збільшення кількості шлаку і зменшення портландцементного клінкеру активність дещо падає, проте абсолютні значення активності при згині залишаються на достатньо високому рівні. Цей рівень активності відповідає портландцементу (ПЦ) із вмістом клінкеру 95 %, що свідчить про вичерпання можливостей збільшення активності за рахунок клінкеру. Необхідно зазначити, що абсолютні значення активності при згині ШЛВ, КВ–3, КВ–4 і ПЦ розміщені приблизно на однаковому рівні.

Наведені дані (табл.1) свідчать про відсутність закону адитивності в синтезі міцності шлаковмісних в'яжучих, активність яких при згині залежить від виду і вмісту активатору, а також від вмісту і гідравлічної активності пуцоланових компонентів.

Водночас шлаколужні (крім ШЛВ-С на рідинному склі) і композиційні в'яжучі забезпечують значно вище співвідношення активностей при згині і стисканні порівняно з портландцементом. Це свідчить про переважний характер адгезійних сил над когезійними за рахунок здатності новоутворень в'яжучих до хімічної взаємодії в контактних зонах із зернами піску.

Отже, різноманітність рецептурних рішень мало- і безклінкерних в'яжучих, об'єднана участю в них сполук лужних металів, хіміко-мінералогічна подібність продуктів гідратації, зменшення кількості кальцієвих сполук в новоутвореннях на користь лужних та їхньої повної переваги в шлаколужному камені, можливість спрямованого структуроутворення в таких системах зумовлюють широкий діапазон міцнісних і спеціальних властивостей таких в'яжучих. Це, своєю чергою, забезпечує можливості для отримання бетонів із заданими властивостями, що відповідають умовам їхньої експлуатації.

Таблиця 1

Склад та активність досліджуваних в'яжучих

№ з/п	**Вид в'яжучого**	Компонентний склад, % за мас.					Активність, МПа, 28 діб при		$\frac{R_{btb}}{R}$
		п/ц клінкер	домен шлак	перліт	зола-виносу	активатор	згині	стиску	
1	Шлаколужне–К	–	100	–	–	содолужний плав	6,1-7,0	28,4-32,7	0,214
2	Шлаколужне–С	–	100	–	–	дисилікат натрію	5,7-7,3	51,8-72,6	0,105
3	Композиційне–1	20	40	–	40	сульфат натрію	4,1-4,8	18,0-19,1	0,240
4	Композиційне–2	20	40	40	–	сульфат натрію	5,0-5,6	19,0-22,6	0,255
5	Композиційне–3	50	15	35	–	сульфат натрію	6,2-7,5	23,4-31,0	0,215
6	Композиційне–4	65	15	–	20	сульфат натрію	6,8-8,4	27,3-34,0	0,248
7	Портланд-цемент	95	–	–	–	двоводний гіпс	6,8-7,3	39,2-42,0	0,174

За ключовим показником міцності дорожніх бетонів – на розтяг при згині бетони на основі мало- і безклінкерних в'яжучих не поступаються традиційному за винятком бетону на рідинному склі, де спостерігається яскраво виражений крихкий характер руйнування (табл.2). Про наявність

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

хімічної взаємодії цементного каменю і крупного заповнювача свідчить значно вищий рівень співвідношення міцностей на згин і стискання у бетонів на ШЛВ і КВ. Це, вочевидь, пов'язано з специфікою новоутворень цих в'яжучих і хімічною активацією поверхні заповнювачів аніонною складовою активаторів.

Характерні для них менші значення модуля пружності зумовлюють нижчий рівень напружень у дорожній плиті, а вищі значення умовної граничної розтяжності дають підставу для прогнозування їхньої підвищеної тріщиностійкості.

Отже, бетони на ШЛВ і КВ характеризуються більшою однорідністю структури і міцністю контактних зон, що з позицій механіки руйнування забезпечує їм перевагу над традиційним бетоном.

У технології бетонів поширені стохастичні системи, адже у багатокомпонентних системах діє велика кількість взаємопов'язаних факторів. З них лише частину можна детерміновано врахувати, а інші фактори завжди створюють випадковий ефект. Справжній характер залежності досліджуваної характеристики може бути не завжди відомим, проте для розв'язання практичних задач достатньо знайти його наближений вираз. У результаті регресивного аналізу експериментальних даних отримано рівняння регресії у вигляді поліномів другого та третього порядку, що описують характер зміни досліджуваних характеристик залежно від значень вибраних факторів. Статистичне оброблення одержаних рівнянь показала їхню адекватність у вибраному факторному просторі при 95% довірчій ймовірності [2–4].

Таблиця 2

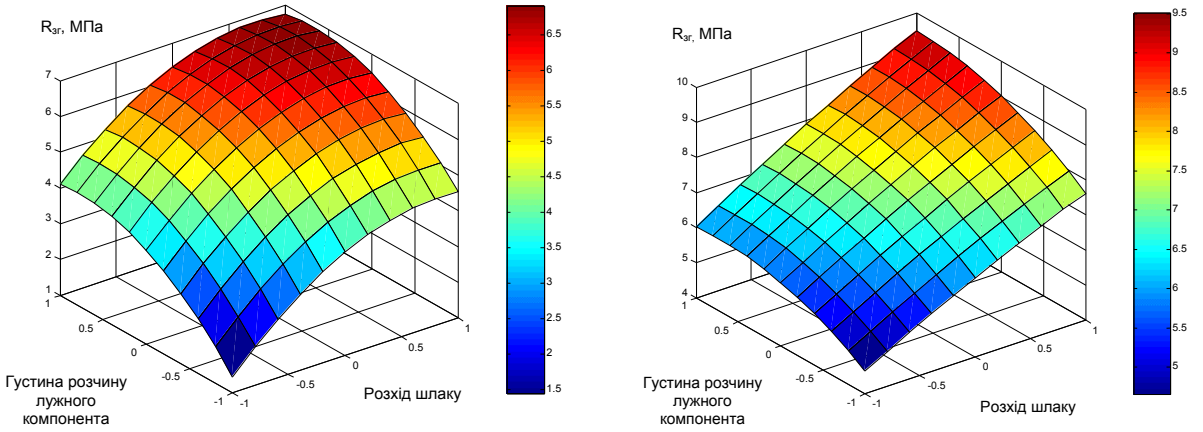
Склад та властивості досліджуваних бетонів

№ з/п	Вид бетону	Витрата матеріалу, кг/м^3				Міцність – 28 діб, МПа, при		R/R_{btb}	Модуль пружності Е, МПа* 10^3 при	
		в'яжуче	пісок	щебінь	розчин активатора (вода)	стиску R	згині R_{btb}		стиску	згині
1	Шлако-лужний на ШЛВ-К	500	560	1225	160	41,0	6,4	0,156	36,0	-
2	Шлако-лужний на ШЛВ-С	500	560	1225	185	71,5	5,4	0,078	34,0	–
3	Бетон на КВ-3	500	581	1109	190	39,5	7,6	0,192	33,8	22,1
4	Бетон на КВ-4	500	663	1026	190	46,3	8,0	0,173	38,8	26,4
5	Бетон на ПЦ	500	663	1026	190	66,5	7,7	0,116	41,1	30,1

Отримані поліноми для бетонів на композиційних і шлаколужних в'яжучих є ЕС-моделями досліджуваних характеристик бетону у вибраному факторному просторі. Приклади розв'язання аналітико-геометричних задач на основі ЕС-моделей, описаних в роботах [2–4], які полягають у побудові поверхонь відгуку показників міцності бетонів на шлаколужних і композиційних в'яжучих наведено на рис. 1–5.

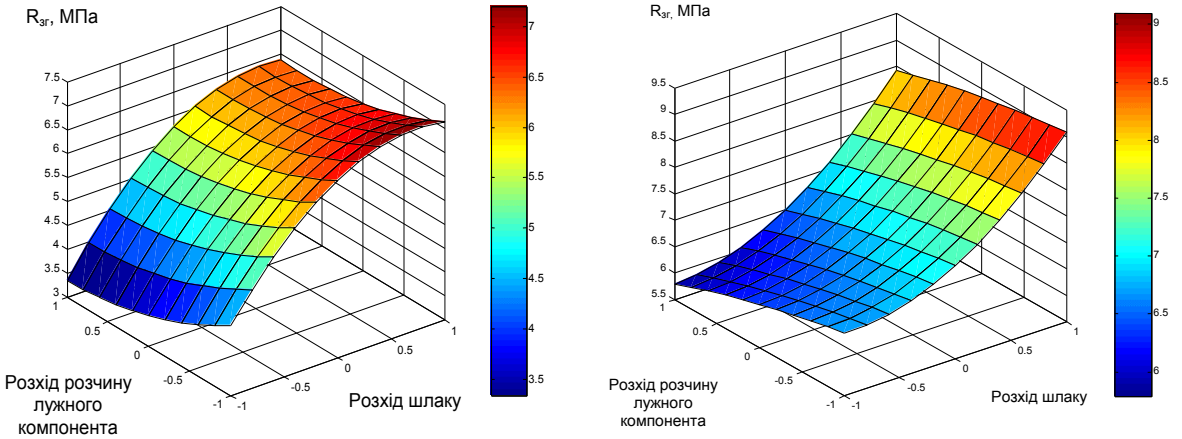
Побудовані поверхні відгуку наочно якісно і кількісно відображають вплив рецептурно-технологічних факторів у межах вибраного факторного простору на показники міцності бетонів на розтяг при згині і стиск, що дає можливість в кожному конкретному випадку розв'язувати задачу підбирання складу бетонів за критерієм міцності.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua



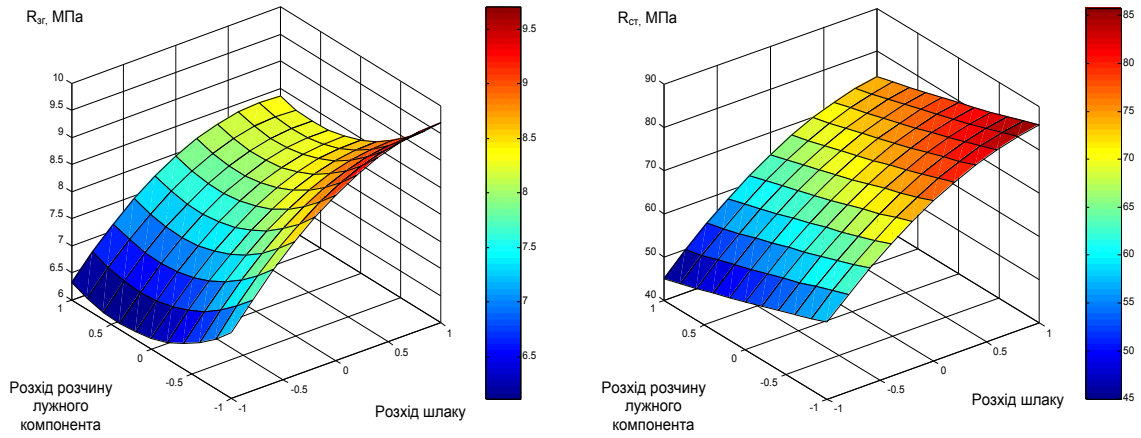
а *б*

Рис. 1. Поверхні відгуку міцності на згин шлаколужного бетону на карбонатному лужному компоненті у віці 28 діб нормального твердіння (а) і після ТВО (б)



а *б*

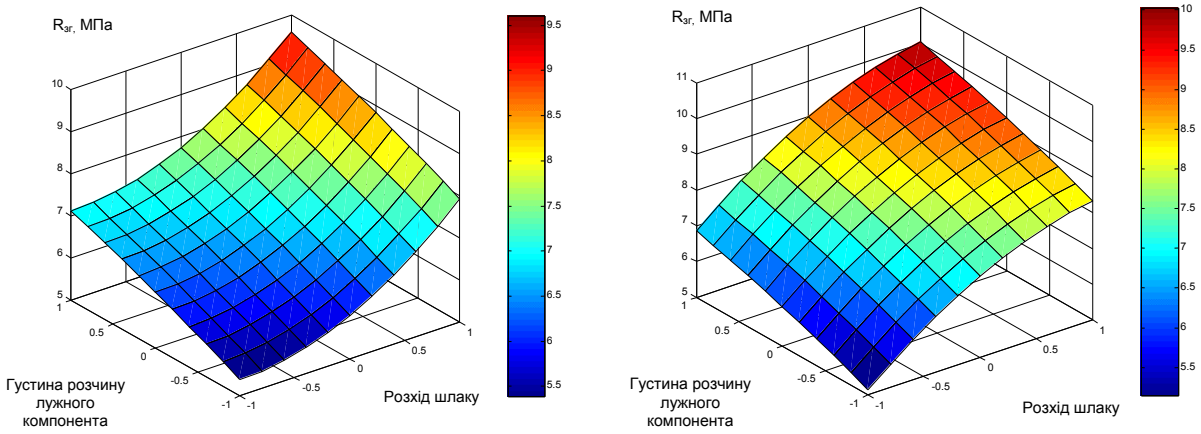
Рис. 2. Поверхні відгуку міцності на згин шлаколужного бетону нормального твердіння у віці 28 діб на карбонатному (а) і силікатному (б) лужних компонентах



а *б*

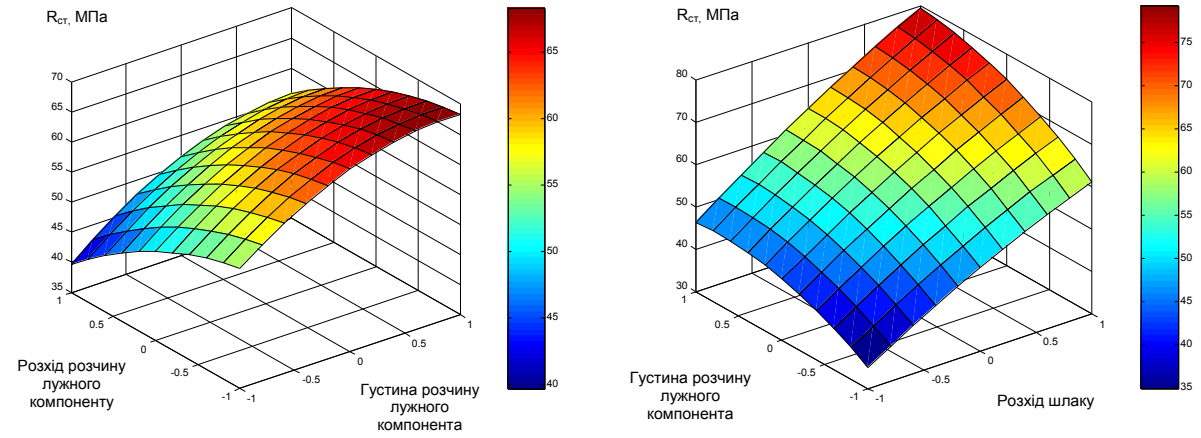
Рис. 3. Поверхні відгуку міцності на згин (а) і на стиск (б) шлаколужного бетону на силікатному лужному компоненті після ТВО у віці 28 діб

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

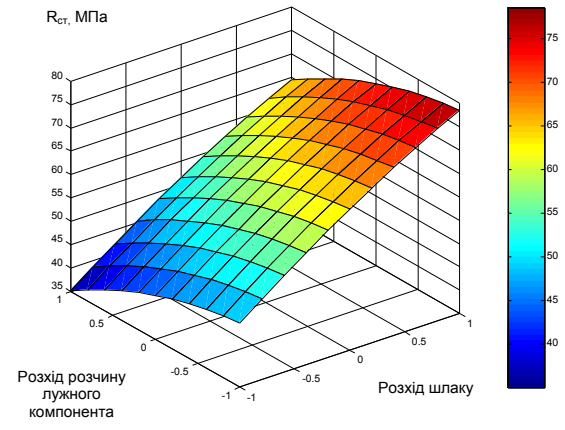


а *б*

Рис. 4. Поверхні відгуку міцності на згин шлаколужного бетону на силікатному лужному компоненті нормального твердіння у віці 28 (а) і 90 діб (б)



а *б*



в

а) витрата шлаку – 450 кг/м^3;

б) витрата розчину содолужного плаву – 170 л/ м^3;

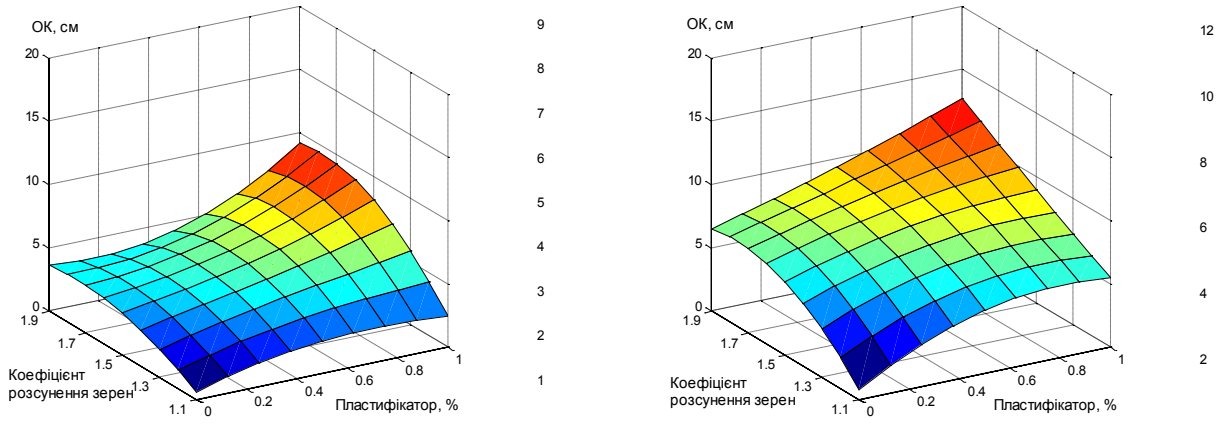
в) густина розчину содолужного плаву – 1,15 г/см^3.

Рис. 5. Поверхні відгуку міцності на стиск шлаколужного бетону на карбонатному лужному компоненті після ТВО у віці 28 діб при послідовній дискретизації факторів на середньому рівні

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

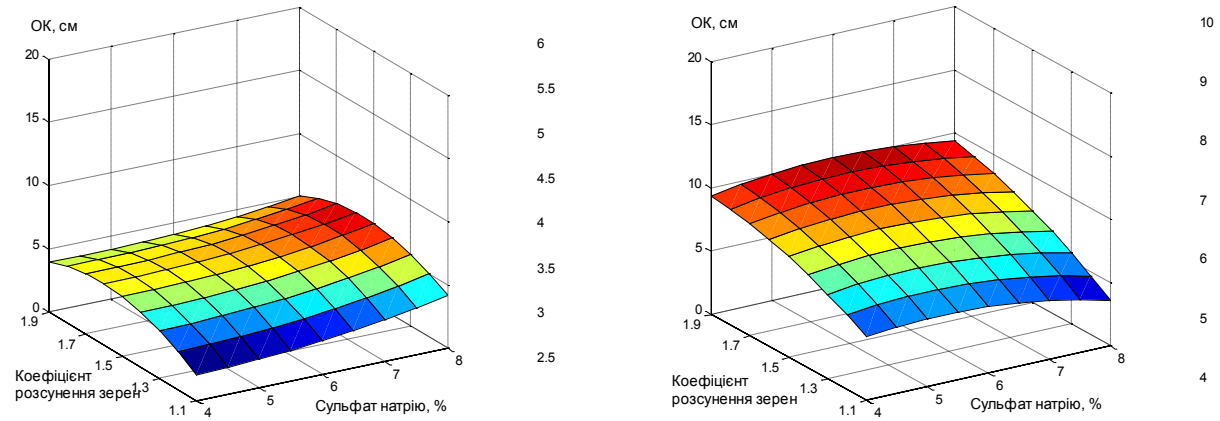
Для успішного використання математичних методів та ЕС- моделей велике значення мають правильна оцінка технологічних факторів та вибір відповідних критеріїв, що потребує аналізу багатокомпонентних систем

а *б*



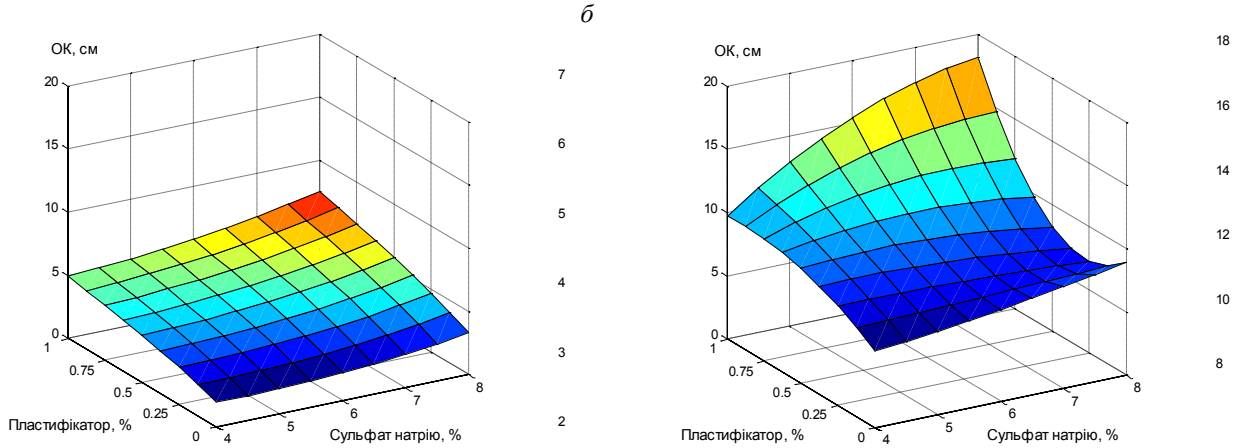
При дискретизації витрати Na_2SO_4 на середньому рівні

а *б*



При дискретизації кількості пластифікатору на середньому рівні

а *б*



При дискретизації коефіцієнта розсунення щебеню на середньому рівні

Рис. 6. Поверхні відгуку показника осадки конусу бетонної суміші на КЦ-3 (а) і КЦ-4 (б)

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

До найзначущіших кількісних факторів впливу в технології бетонів на мало- і безклінкерних в'яжучих можна зарахувати: компонентний склад і витрату в'яжучого, кількість активатора і додатків-модифікаторів, коефіцієнт розсунення зерен щебеню. До якісних факторів впливу належать: умови (нормальні і тепловологісна обробка) та строки твердіння, вид в'яжучого і лужного компонентів. Як критерії оптимальності важливе значення для дорожнього бетону відіграють показники міцності на розтяг при згині і стисканні, характеристики деформативності та довговічності, легкоукладальність бетонної суміші.

В деяких випадках рівняння регресії у вигляді поліномів 2-го порядку адекватно не описують характер залежності властивостей від рецептурно-технологічних факторів бетонів. Тому виникає необхідність у використанні поліномів 3-го порядку. Зокрема, моделювання залежності легкоукладальності бетонної суміші від факторів складу бетону на композиційних модифікованих в'яжучих реалізовано з використанням поліномів 3-го порядку. Розв'язання аналітико-геометричної задачі на основі такої ЕС-моделі наведено на рис. 6.

Висновки

1. Розв'язання аналітико-геометричних задач на основі ЕС-моделей дає можливість оцінити кількісний і якісний вплив рецептурно-технологічних факторів на властивості бетону і бетонних сумішей.

2. ЕС-моделі можуть бути використані для вивчення та управління властивостями бетонів (характеристики міцності, деформативності, довговічності), а також для вибору оптимальних значень факторів в межах області їхньої варіації за визначеним критерієм (витрати цементу, модифікатора тощо) за заданих властивостей бетону (міцність, морозостійкість тощо).

3. За основним показником якості дорожніх бетонів – міцністю на розтяг при згині бетони на основі композиційних і шлаколужних в'яжучих мають перевагу перед традиційними, що створює передумови для їхнього ефективного використання при влаштуванні основ і покриттів дорожніх одягів.

1. Пелешко І. Д., Юрченко В. В. Програмне забезпечення для апроксимації дискретних даних // Вісник Львівського державного аграрного університету: Архітектура і сільськогосподарське будівництво, №1. – Львів, 2000. – С.181–187. 2. Солодкий С.И. Шлакощелочной бетон для строительства жестких дорожных покрытий: Автореф. дис…канд. техн. наук: 05.23.05/ КИСИ. – К., 1991. 3. Солодкий С.Й. Русин Р.М. Оптимізація рецептурно-технологічних параметрів бетону для дорожнього будівництва на основі модифікованих композиційних цементів // Будівництво України. – 2004. – №4. – С. 22–27. 4. Солодкий С.Й., Русин Р.М., Томецька С.І. Оптимізація рецептурно-технологічних параметрів бетону для виробів дорожнього призначення на основі модифікованих композиційних цементів // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – Львів. – 2004.– № 520. – С. 183–191.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua