

УДК 691.5+519.242

<https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.1.9>**Н. Є. ТЕЛІЦИНА**

кандидат технічних наук, доцент,  
старший викладач кафедри кібернетики хіміко-технологічних процесів  
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського  
ORCID: 0009-0007-3145-8718

**О. О. КВІТКА**

кандидат хімічних наук, доцент,  
доцент кафедри технічних та програмних засобів автоматизації  
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського  
ORCID: 0000-0003-4034-7052

**А. М. ШАХНОВСЬКИЙ**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри технології неорганічних речовин, водоочищення  
та загальної хімічної технології  
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського  
ORCID: 0000-0003-2963-4026

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДУ СУХИХ БУДІВЕЛЬНИХ СУМІШЕЙ: ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ЧАСТКИ МОДИФІКУЮЧОЇ ДОБАВКИ

*Представлена робота присвячена дослідженням щодо наукового обґрунтування складу мінерально-полімерних композицій – сухих будівельних сумішей для здійснення мурувальних робіт із заданими показниками якості, із використанням методів комп'ютерного будівельного матеріалознавства: експериментально-статистичного моделювання та багатокритеріальної оптимізації.*

*Сформовано множини рецептурних факторів, що впливають на якість будівельної суміші та виділено вміст модифікуючої добавки у якості змінюваного параметра.*

*За результатами попереднього відсіювання сформовано множини характеристик-критеріїв якості, що достатньо повно описують споживацькі властивості будівельної суміші (а саме – міцність на стиск, рухомість будівельної суміші, водоутримуючу здатність, густину розчинної суміші, пористість). Підготовано матрицю плану активного експерименту та реалізовано натурні експерименти із отриманням чисельних значень критеріїв якості. Побудовано поліноміальні моделі «якісний та кількісний склад суміші – параметри якості мурувального розчину» та здійснено їх статистичну перевірку. Чисельним методом багатокритеріальної оптимізації із використанням функції бажаності Харінгтона знайдено компромісні значення, які відповідають оптимуму множини критеріїв якості суміші та відповідне співвідношення складників суміші.*

*За результатами досліджень на основі параметричної ідентифікації експериментально-статистичних моделей з використанням методів багатоцільової оптимізації було запропоновано параметри якості сухої будівельної суміші для мурувальних робіт із врахуванням чинних норм та вимог виробників і споживачів. Було запропоновано оптимальний склад сухої будівельної суміші для мурувальних робіт: цемент 15%; модифікуюча добавка 0,035%; вода 0,126 %; пісок 52%. На наступному етапі досліджень планується вивчення чутливості отриманого оптимального рішення до змін у складі сировини.*

**Ключові слова:** *суха будівельна суміш, рецептура, експлуатаційні характеристики, модифікуючі добавки, планування експерименту, експериментально-статистичне моделювання, багатокритеріальна оптимізація.*

**N. E. TELITSYNA**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Senior Lecturer at the Department of Cybernetics of Chemical Technology  
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute  
ORCID: 0009-0007-3145-8718

**O. O. KVITKA**

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor at the Automation Hardware and Software Department  
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute  
ORCID: 0000-0003-4034-7052

A. M. SHAKHNOVSKY

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Inorganic Substances,  
Water Treatment and General Chemical Technology  
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute  
ORCID: 0000-0003-2963-4026

## EXPERIMENTAL STATISTICAL MODELING OF DRY CONSTRUCTION MIXTURES FORMULATION: OPTIMAL CONTENT OF THE MODIFYING ADMIXTURE DETERMINATION

*The proposed article is concerned with the scientific justification of the dry construction mixtures formulation. The formulation of dry construction mixture for masonry works (as mineral-polymer composition) with the given quality parameters was developed through the methods of computer construction materials science: experimental-statistical modeling and multi-criteria optimization.*

*A set of recipe factors affecting the quality of the construction mixture was formed and then the content of the modifying admixture was selected as a variable parameter. Based on the results of preliminary screening, a set of consumer properties of the construction mixture (namely compressive strength, mobility of the construction mixture, water-holding capacity, density of soluble mixtures, porosity) was selected as quality criteria. The active experimental design matrix was prepared and active experiments were carried out to obtain numerical values of quality criteria. Polynomial models "qualitative and quantitative composition of the mixture vs quality parameters of masonry mortar" were built and statistically verified by analysis of variance (ANOVA) approach. Using the Harrington desirability function-based numerical method of multi-criteria optimization, quality criteria optimal (compromise) values were found that correspond to the optimum of a set of mixture quality criteria and the corresponding ratio of mixture components was determined.*

*In the course of presented research based on parametric identification of experimental-statistical models using multi-objective optimization methods, quality parameters of dry construction mix for masonry work were proposed, taking into account current standards and requirements of manufacturers and consumers. As the outcome of research, the optimal composition of the dry construction mixture for masonry works was obtained: cement 15%; modifying admixture 0.035%; water 0.126%; sand 52%. At the next stage of research, it is planned to study the sensitivity of the obtained optimal solution to changes in the composition of raw materials.*

**Key words:** dry construction mixture, formulation, operational characteristics, modifying admixture, experimental design, experimental statistical modeling, multi-criteria optimization.

### Вступ

Представлена робота присвячена дослідженням щодо наукового обґрунтування складу мінерально-полімерних композицій – сухих будівельних сумішей для здійснення мурувальних робіт (зокрема, для зведення несучих стін та перегородок з керамічної цегли). Будівельні розчини і бетони із сухих сумішей промислового виготовлення мають низку переваг порівняно з традиційними будівельними розчинами і бетонами. Серед вказаних переваг, зокрема, стабільність показників якості, підвищення продуктивності будівельних процесів за рахунок скорочення і спрощення логістичних шляхів та технологічного ланцюжка приготування сумішей, покращених експлуатаційних властивостей сухих сумішей, тощо. При цьому, визначення оптимального якісного і кількісного складу таких сумішей, покликано забезпечити належні експлуатаційні характеристики, є складною комбінаторною задачею. Тому для розроблення рецептур сухих будівельних сумішей (тобто, для визначення конкретного виду зв'язника, наповнювача, хімічних добавок, що регулюють тужавіння і твердіння продукту, пластифікувальних піно- та газоутворювальних домішок тощо, а також для визначення науково-обґрунтованого співвідношення компонентів у сухій будівельній суміші) з успіхом використовується методологія комп'ютерного моделювання на основі експериментально-статистичних математичних моделей [1, 2]. У низці публікацій представлено дослідження щодо використання різних типів наповнювачів, зокрема, кварцевого піску, у якості повної або часткової заміни традиційного річкового піску в складі будівельних розчинів [3, 4] та бетонів [5, 6]. Автори [7] на основі нейромережевого прогнозування властивостей будівельних розчинів показали, що мікроструктуру та механічну міцність вказаних розчинів вдається покращити шляхом додавання природних цеолітів та нанокремнеземних матеріалів. Збільшенню тиксотропності, динамічної межі текучості та пластичної в'язкості будівельного розчину може сприяти додавання до складу сумішей гумових волокон [8]. Визначенню оптимальної частки у суміші водостійких та пластифікувальних добавок присвячено дослідження [9, 10, 11], оптимальної частки наповнювача та багатофункціональних модифікуючих добавок – дослідження [12, 13].

Авторами ставилася задача науково обґрунтувати рецептуру сухої будівельної суміші для мурувальних робіт із бажаними (відповідними нормативам та побажанням експертів) показниками якості, для чого:

– на основі апріорної інформації та технічних можливостей підприємства-об'єкту досліджень сформувати множину факторів, що впливають на якість будівельної суміші; виділити підмножини змінюваних (досліджуваних) факторів та факторів, зафіксованих на відомому оптимальному рівні; сформувати множину критеріїв якості, що достатньо повно характеризують споживацькі властивості будівельної суміші;

- підготувати матрицю плану активного експерименту та реалізувати натурні експерименти із отриманням чисельних значень критеріїв якості;
- апроксимувати результати експериментів поліноміальними моделями «якісний та кількісний складу суміші – параметри якості мурувального розчину»;
- знайти компромісні значення, які відповідають оптимуму множини критеріїв якості суміші та відповідне співвідношення складників суміші.

Конкретним завданням представленої роботи в системі задач, окреслених вище, було визначення оптимальної частки модифікуючої добавки у складі сухої будівельної суміші.

#### Експериментальні дослідження

Експериментальні дослідження проводилися в лабораторії підприємства-виробника; умови підготування пробних зразків, проведення експериментів (випробування сумішей) визначалися чинними нормативами, зокрема, ДСТУ Б В.2.7-185:2009, ДСТУ Б В.2.7-187:2009, ДСТУ Б В.2.7-239:2010, ДСТУ-Н Б В.2.6-212:2016 із врахуванням міжнародних стандартів, зокрема, BS EN 196-1:2016. Загальні параметри оптимізованих будівельних сумішей відповідали границям, окресленим у відповідному Державному стандарті ДСТУ Б В.2.7-126:2011.

Досліджувався склад та характеристики сухої будівельної суміші – мурувального розчину для зведення будівельних конструкцій з керамічної цегли. До складу досліджуваної суміші входили наступні компоненти: цемент М-400 незмінного хіміко-мінералогічного складу, пісок річковий сухий (0–1,25 мм), граніт подрібнений фракціонований (0,63–0,2 мм), пісок кварцевий фракціонований (0,8–1,25 мм), вапно, багатофункціональна полімерна модифікуюча добавка Vertocolл ССА-425, вода.

За результатами попередніх експериментів для цілей поточного дослідження частку цементу у будівельній суміші було зафіксовано на рівні 30%, частки піску річкового та кварцевого – на рівнях 52% та 30% відповідно. Вплив модифікуючої добавки вивчався шляхом варіювання її частки у суміші в діапазоні від 0,025% до 0,05% (з часткою води у суміші 12,5%–14,0%).

З комплексу властивостей сухих сумішей, за яким заведено судити про їх експлуатаційні властивості (зокрема, дисперсність, насипна густина, гігроскопічність, сухої суміші; водоутримування, об'ємна маса, пластичність, строки тужавлення та твердіння приготованого будівельного розчину; об'ємна маса, міцність на стиск, міцність зчеплення з основою, пористість, довговічність затверділого розчину), за результатами попереднього відсіювання для даного дослідження було обрано наступні критерії якості:

- $y_1$  – міцність на стиск, МПа;
- $y_2$  – рухомість будівельної суміші, см;
- $y_3$  – водоутримуюча здатність, %;
- $y_4$  – густина розчинної суміші, г/л;
- $y_5$  – пористість, %.

Під час вибору матриці планування експерименту доводилося враховувати наступну відому особливість задач проектування сумішей. Практичні міркування вимагають будувати план експерименту в такий спосіб, щоб забезпечити присутність у суміші усіх компонентів з ненульовою часткою. Саме через описану вимогу, у практиці експериментально-статистичного моделювання для розробки оптимального складу будівельних сумішей і бетонів часто застосовують спеціальні прийоми перетворення складу, зокрема, псевдокомпоненти, співвідношення компонентів тощо [4, 12-15]. Такий підхід в даному випадку часто виявляється ефективнішим за застосування планів експериментів класу «склад-властивість» у «класичному» для дослідження сумішей (симплексному) факторному просторі [16, 17].

З урахуванням зазначеного, у якості факторів експерименту були прийняті співвідношення часток компонентів:  $x_1$  – співвідношення вмісту модифікуючої добавки до вмісту цементу;  $x_2$  – співвідношення вмісту води до вмісту цементу (водно-цементне співвідношення).

Інтервали варіювання факторів експерименту (в натуральній формі) наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

#### Інтервали варіювання факторів експерименту

Фактор	$x_1$	$x_2$
Нижній рівень	0,0008	0,96
Верхній рівень	0,0040	1,60

У випадку дворівневого факторного простору, застосованого у даному дослідженні, нижньому рівню варіювання факторів у кодованій формі відповідає значення  $(-1)$ , а верхньому рівню варіювання – значення  $(+1)$ . Наведений у лівій частині таблиці 2 центральний композиційний план другого порядку містить рекомендовані до реалізації значення факторів (у кодованій формі).

Внаслідок лабораторної реалізації було отримано значення критеріїв якості (відгуків), наведені у правій частині таблиці 2.

Таблиця 2

**План експерименту та результати його реалізації**

Номер досліджу	План експерименту		Значення критеріїв якості				
	$x_1$	$x_2$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$
1	-1,4142	0	3,32351	6,55014	96,1156	1574,05	27,6617
2	1,41421	0	8,51389	3,52113	85,4995	1959,91	14,0415
3	1	1	8,62871	5,38991	84,8088	1900,69	16,2651
4	-1	-1	5,99403	5,93844	93,6604	1682,44	24,6036
5	0	0	6,99782	6,01915	89,3327	1809,04	17,2462
6	1	-1	9,41509	4,34705	86,8062	1945,58	16,5408
7	0	0	7,01126	5,94198	88,4453	1802,09	17,1195
8	0	0	7,00256	6,03699	87,9964	1802,74	17,1474
9	0	0	6,93903	5,98079	88,4166	1796,25	17,2041
10	-1	1	4,64861	8,03071	93,8565	1644,84	27,0808
11	0	-1,4142	9,16422	5,70337	90,8672	1844,68	20,8527
12	0	1,41421	7,61673	7,76576	86,6476	1768,87	22,4172
13	0	0	6,9066	5,98374	88,5239	1808,91	17,2218

**Параметрична ідентифікація математичних моделей**

У якості математичних моделей було використано поліноми вигляду:

$$y_j = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1x_2 + a_4x_1^2 + a_5x_2^2, \quad j = \overline{1,5}. \tag{1}$$

Параметрична ідентифікація поліноміальних експериментально-статистичних моделей (1) зводиться до знаходження методом найменших квадратів коефіцієнтів  $a_0, \dots, a_5$  для кожної з моделей на основі результатів експерименту (табл. 2). Результати параметричної ідентифікації експериментально-статистичних моделей (1) наведено у таблиці 3.

Для статистичної перевірки ідентифікованих моделей додатково до експериментів, результати яких наведено у таблиці 2, для кожної моделі було проведено шість експериментів (три комбінації значень факторів, два паралельні досліди) у контрольних точках. Статистична перевірка математичних моделей (ANOVA) показала, що усі вони є адекватними досліджуваній системі, і можуть бути використані для розробки оптимальної рецептури сухої будівельної суміші.

Таблиця 3

**Результати параметричної ідентифікації математичних моделей**

Коефіцієнти	Відгуки	$y_1$ розр	$y_2$ розр	$y_3$ розр	$y_4$ розр	$y_5$ розр
	$a_0$		6,97145	5,99253	88,54297	1803,806
$a_1$		1,84268	-1,06448	-3,86443	133,08608	-4,76754
$a_2$		-0,540037	0,756474	-0,971095	-23,71203	0,551744
$a_3$		0,13976	-0,262351	-0,548362	-1,81968	-0,688221
$a_4$		-0,522122	-0,468091	1,13241	-16,78611	1,80173
$a_5$		0,713767	0,381373	0,107338	3,1112	2,1934

**Оптимізація складу сухої будівельної суміші**

Оптимізація складу сухої будівельної суміші для мурувальних робіт у представленому дослідженні мала на меті знаходження співвідношення пов'язаних із вмістом добавки складників суміші  $x_i, i = 1, 2$ , які відповідали б оптимуму усієї множини критеріїв якості суміші  $y_j, j = 1, 2, \dots, 5$ , представлених у вигляді цільових функцій (1) з коефіцієнтами таблиці 3. При цьому решту факторів складу суміші, як вже зазначалося вище, було зафіксовано на рівні оптимальних значень, визначених попередніми дослідженнями.

Якісне дослідження співвідношення поверхонь відгуку (рис. 1, а-д) дозволяє твердити, що досліджувана система критеріїв якості будівельної суміші включає конфліктуючі критерії. Взаємно суперечні вимоги критеріїв оптимальності, а також необхідність одночасного врахування значної кількості критеріїв якості, зумовлюють малу площу зони компромісу (рис 1, е), що відповідає у факторному просторі області значень  $x_1, x_2$ , які не суперечать жодному з критеріїв.

На першому етапі кількісного дослідження з багатокритеріальної оптимізації сухих будівельних сумішей для мурувальних робіт було обрано чисельний метод оптимізації. Досвід авторів щодо системного пошуку оптимального багатокритеріальних задач на основі експериментально-статистичних математичних моделей та комп’ютерного моделювання [4, 12, 13, 18] показує, що зазвичай достатньо ефективними для цих цілей виявляються методи згортки показників якості (як у класичній реалізації, так із нормуванням – наприклад, на основі функцій бажаності). В представленому випадку, беручи під увагу малу площу зони взаємного компромісу критеріїв оптимальності, багатокритеріальну оптимізацію було здійснено із використанням функції бажаності Харінгтона [19]. Згортка критеріїв бажаності при цьому представлена «загальною бажаністю», що є середнім геометричним індивідуальних функцій бажаності:

$$D(y) = \left[ \prod_{j=1}^m d_j(y_j) \right]^{\frac{1}{m}}, \tag{2}$$

де  $D(y)$  – узагальнений критерій бажаності;  $d_j(y_j)$  – індивідуальні функції бажаності, отримані відображенням критеріїв якості суміші  $y_j, j=1,2,\dots,5$  на шкалу бажаності,  $m=5$  – кількість відгуків (критеріїв якості).

На другому етапі кількісного дослідження з багатокритеріальної оптимізації сухих будівельних сумішей в ході реалізації процедури оптимізації для усіх критеріїв якості використовувалися однобічні профілі індивідуальних часткових функцій бажаності  $d_j(y_j), j=1,2,\dots,5$ . Ідентифікація часткових функцій бажаності для кожного з критеріїв якості суміші здійснювалася на основі емпіричних опорних відміток на шкалі бажаності (табл. 4).

Таблиця 4

**Значення опорних відміток на шкалі бажаності**

	«Менш бажане» значення	«Більш бажане» значення
$y_1$	7,5	8,3
$y_2$	5	7
$y_3$	90	96
$y_4$	1600	1800
$y_5$	18	23

Із використанням агрегованої функції (2) множинні характеристики якості перетворюються в еквівалентну єдину характеристику якості, яка підлягає подальшій оптимізації, тобто складна задача багатоцільової оптимізації перетворюється на істотно більш просту задачу однокритеріальної оптимізації із можливістю знаходження оптимальних значень вхідних змінних  $x^*$ , що максимізують загальну бажаність  $D$ ; чим вище значення  $D$ , тим кращий компроміс між відгуками. Деякі альтернативні комбінації значень факторів, що відповідають найбільш високому узагальненому критерію бажаності, наведено у таблиці 5.

Після рекодування до натуральних значень факторів складу за результатами розрахунків було запропоновано в якості оптимального значення 0,035% частки модифікуючої добавки у сухій будівельній суміші (табл. 6).

Таблиця 5

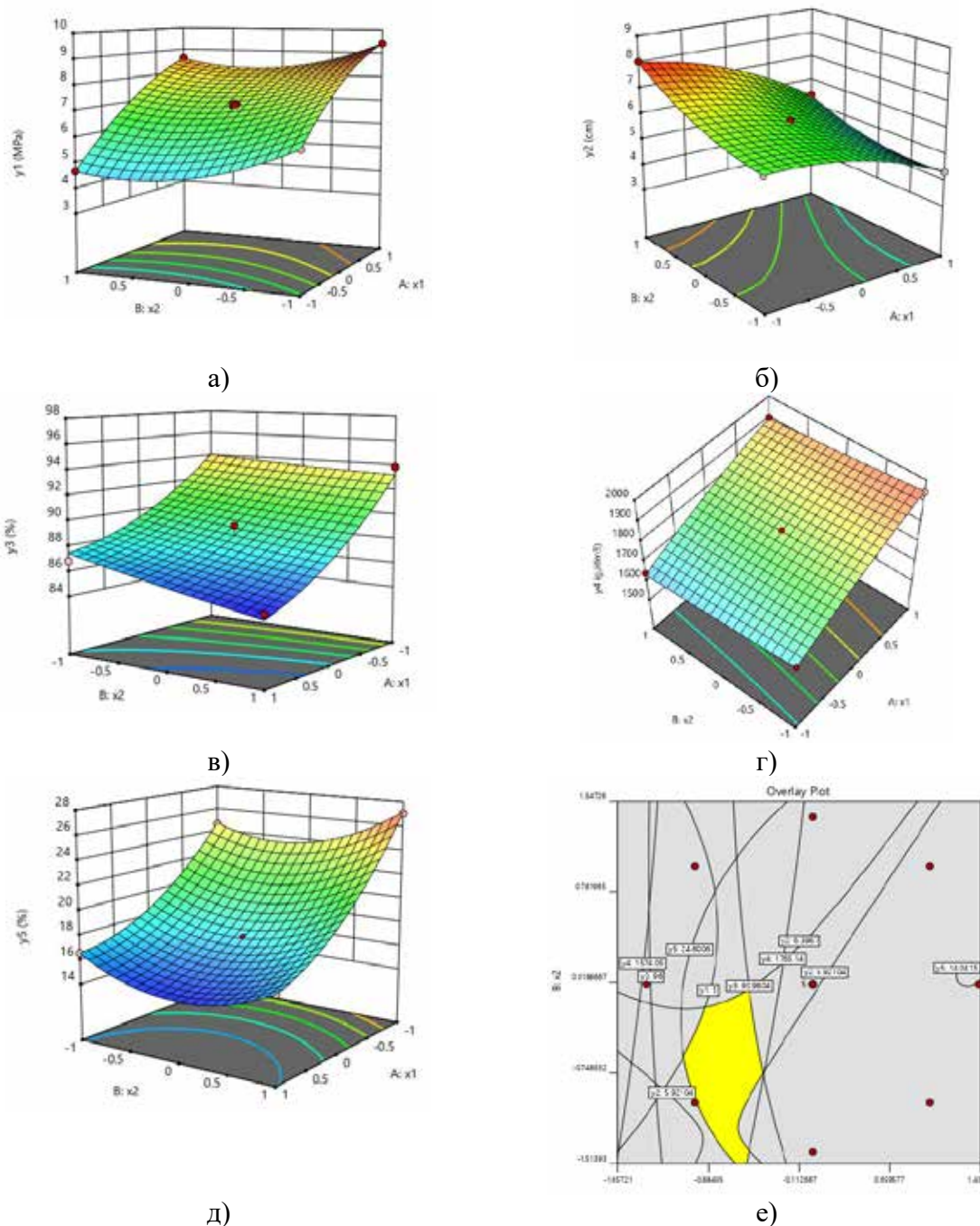
**Альтернативні комбінації значень факторів, що відповідають високому узагальненому критерію бажаності**

№	$x_1$	$x_2$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$D$
1	-0,07	-1,00	8,15	5,66	89,22	1811,93	19,68	0,43
2	-0,33	-0,95	7,54	5,83	90,12	1774,55	20,65	0,40
3	-0,06	-0,96	8,08	5,65	89,17	1811,73	19,49	0,41
4	-0,34	-0,96	7,54	5,83	90,17	1773,05	20,76	0,41
5	-0,07	-0,99	8,13	5,66	89,21	1811,76	19,66	0,42
6	-0,11	-0,97	8,02	5,69	89,33	1805,69	19,74	0,42
7	-0,12	-0,98	8,01	5,70	89,39	1804,07	19,83	0,43
8	-0,26	-0,98	7,74	5,78	89,88	1784,98	20,45	0,43
9	0,00	-1,00	8,26	5,60	89,00	1820,94	19,41	0,41
10	-0,02	-0,98	8,19	5,62	89,05	1817,54	19,41	0,41

Таблиця 6

**Результати багатокритеріальної оптимізації в натуральних значеннях**

Частка добавки, %	Частка води, %	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$
0,035	0,126	7,89	5,69	89,24	1805,05	19,37



**Рис. 1.** До аналізу поверхонь відгуку критеріїв якості сухої будівельної суміші:  
 а–д – поверхні відгуку для критеріїв  $u_1 - u_5$ ; відповідно; е – компромісна область у проекції на площину факторного простору (червоними маркерами показано точки факторного простору, що відповідають плану експерименту)

### Висновки

За результатами досліджень було запропоновано параметри якості сухої будівельної суміші для мурувальних робіт із врахування чинних норм та вимог виробничників і споживачів. Було запропоновано та реалізовано план активного експерименту і виявлено залежності параметрів якості мурувального розчину від якісного та кількісного складу суміші, визначено компромісну зону для кількісного співвідношення складників сухої суміші, що задовольняє заданим значенням параметрів якості. В результаті був отриманий оптимальний склад сухої будівельної суміші для мурувальних робіт: цемент 15%; модифікуюча добавка 0,035%; вода 0,126%; пісок 52%. На наступному етапі досліджень планується вивчення чутливості отриманого оптимального рішення до змін у складі сировини.

## Список використаної літератури

1. Ляшенко Т.В., Вознесенський В.А. Методологія рецептурно-технологічних полів у комп'ютерному будівельному матеріалознавстві: Монографія. Одеса: Астропрінт, 2017. 168 с.
2. Троян В.В. Забезпечення тріщиностійкості бетону масивних споруд: Монографія. К: ТОВ НВП «Інтерсервіс», 2019. 92 с.
3. Bederina M., Makhloufi Z., Bounoua A., Bouziani T. & Quéneudec M. Effect of partial and total replacement of siliceous river sand with limestone crushed sand on the durability of mortars exposed to chemical solutions, *Constr. Build. Mater.* 2013, 47. pp. 146–158, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.037>.
4. Статюха Г.О., Теліцина Н.Є., Суруп І.В. Оптимізація гранулометричного складу наповнювачів для сухих будівельних сумішей. *Вісник ЧДТУ. Хімічні технології і екологія*. 2008. №. 4. с. 57–61.
5. Zhang G., Song J., Yang J. & Liu X., Performance of mortar and concrete made with a fine aggregate of desert sand, *Build. Environ.* 2006, 41 (11). pp. 1478–1481. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.033>.
6. Al-Harthy A.S., Abdel Halim M., Taha R., Al-Jabri K.S. The properties of concrete made with fine dune sand, *Constr. Build. Mater.* 2006. 21 (8). pp. 1803–1808, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.053>.
7. Nasr D., Behforouz B., Borujeni P.R., Borujeni S.A. & Zehtab B. Effect of nano-silica on mechanical properties and durability of self-compacting mortar containing natural zeolite: Experimental investigations and artificial neural network modelling. *Construction and Building Materials* 2019, 229. 116888. [doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116888](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116888)
8. Thakare A.A., Siddique S., Sarode S.N., Deewan R., Gupta V., Gupta S. & Chaudhary S. A study on rheological properties of rubber fiber dosed self-compacting mortar. *Construction and Building Materials*, 2020, 262. 120745. [doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120745](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120745)
9. Yahia A., Khayat K. Experiment design to evaluate interaction of high-range water-reducer and antiwashout admixture in high-performance cement grout. *Cement and Concrete Research*, 2001, 31(5). pp. 749–757. [doi:10.1016/S0008-8846\(01\)00496-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00496-3)
10. Felekoğlu, B., Sankahya, H. Effect of chemical structure of polycarboxylate-based superplasticizers on workability retention of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 2008. 22 (9). pp. 1972–1980. [doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.07.005](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.005)
11. Sychała E., Dachowski R. The Influence of Hydrated Lime and Cellulose Ether Admixture on Water Retention, Rheology and Application Properties of Cement Plastering Mortars. *Materials*. 2021. 14(19). 5487. [doi: 10.3390/ma14195487](https://doi.org/10.3390/ma14195487).
12. Статюха Г.О., Теліцина Н.Є., Яменко А.Б., Суруп І.В. Оптимізація складу сухої будівельної суміші з використанням методу Монте-Карло та функції бажаності. *Східно-європейський журнал передових технологій*. 2008. № 1/4(31). С. 53–56.
13. Статюха Г.О., Теліцина Н.Є., Складанний Д.М., Єременко О.О. Рецептури сухої будівельної суміші із застосуванням згортки показників якості. *Східно-європейський журнал передових технологій*. 2008. № 6/6(36). С. 49–52.
14. Yan W., Wu G. & Dong, Z. Optimization of the mix proportion for desert sand concrete based on a statistical model. *Construction and Building Materials*, 2019, 226, pp. 469–482. [doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.07.287](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.287)
15. Moskalova K., Lyashenko T., Aniskin, A. Modelling the Relations of Rheological Characteristics with Composition of Plaster Mortar. *Materials* 2022, 15(1), 371. DOI: 10.3390/ma15010371
16. Cornell J. A. Experiments with mixtures: Designs, models, and the analysis of mixture data. 3rd ed. New York : Wiley, 2002. 680 p.
17. Nécira B., Belkacem M. & Abadou Y. Statistical analysis of high performance self-compacting mortar containing ternary sand mixtures. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 45. pp. 5166–5171. [doi:10.1016/j.matpr.2021.01.694](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.694)
18. Данилюк А.Г., Шахновський А.М. Розроблення наповнювально-гідрофобізуючої композиції у виробництві велюру зі шкурок нутрії: досвід багатопараметричної оптимізації. *Комп'ютерне моделювання в хімії та технологіях і системах сталого розвитку: Збірник наукових статей, Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. С. 161–168.*
19. Harrington E.C. The Desirability Function. *Industrial Quality Control*, 1965, 21(10). pp. 494–498.

## References

1. Lyashenko T.V., Voznesenskii V.A. (2017) Metodologiya retsepturno-tekhnologichnykh poliv u kompyuternomu budivelnomu materialoznavstvi [Methodology of recipe-technological fields in computer construction materials science]. Odessa: Astroprint, 168 p.
2. Troyan V.V. (2019) Zabezpechennia trischinostiikosti betonu masyvnykh sporud [Ensuring the crack resistance of massive structures concrete]. Kyiv: «Interservice», 92 p.
3. Bederina M., Makhloufi Z., Bounoua A., Bouziani T. & Quéneudec M. (2013) Effect of partial and total replacement of siliceous river sand with limestone crushed sand on the durability of mortars exposed to chemical solutions, *Constr. Build. Mater.* 47. pp. 146–158, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.037>.

4. Statiukha G.O., Telitsyna N.E., Surup I.V. (2008) Optimization of the granulometric composition of fillers for dry construction mixes. *Bulletin of ChSTU. Chemical technologies and ecology*. № 4. pp. 57–61.
5. Zhang G., Song J., Yang J. & Liu X. (2006) Performance of mortar and concrete made with a fine aggregate of desert sand, *Build. Environ.* 41 (11). pp. 1478–1481. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.033>.
6. Al-Harthy A.S., Abdel Halim M., Taha R., Al-Jabri K.S. (2006) The properties of concrete made with fine dune sand, *Constr. Build. Mater.* 21 (8). pp. 1803–1808. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.053>.
7. Nasr D., Behforouz B., Borujeni P.R., Borujeni S.A. & Zehtab B. (2019) Effect of nano-silica on mechanical properties and durability of self-compacting mortar containing natural zeolite: Experimental investigations and artificial neural network modelling. *Construction and Building Materials*, 229. 116888. [doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116888](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116888)
8. Thakare A.A., Siddique S., Sarode S.N., Deewan R., Gupta V., Gupta S. & Chaudhary S. (2020) A study on rheological properties of rubber fiber dosed self-compacting mortar. *Construction and Building Materials*, 262. 120745. [doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120745](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120745)
9. Yahia A., Khayat K. (2001) Experiment design to evaluate interaction of high-range water-reducer and antiwashout admixture in high-performance cement grout. *Cement and Concrete Research*, 31(5). pp. 749–757. [doi:10.1016/S0008-8846\(01\)00496-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00496-3)
10. Felekoğlu, B., Sarikahya, H. (2008) Effect of chemical structure of polycarboxylate-based superplasticizers on workability retention of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 22 (9). pp. 1972–1980. [doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.07.005](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.005)
11. Spychał E., Dachowski R. (2021) The Influence of Hydrated Lime and Cellulose Ether Admixture on Water Retention, Rheology and Application Properties of Cement Plastering Mortars. *Materials*. 14(19). 5487. [doi: 10.3390/ma14195487](https://doi.org/10.3390/ma14195487).
12. Statiukha G.O., Telitsyna N.E., Yamenko A.B., Surup I.V. (2008) Optimization of the composition of the dry construction mixture using the Monte Carlo method and the desirability function. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. № 1/4(31). pp. 53–56.
13. Statiukha G.O., Telitsyna N.E., Skladannyi D.M., Eremenko O.O. (2008) Formulations of dry construction mixture using the convolution of quality indicators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. № 6/6(36). pp. 49–52.
14. Yan W., Wu G. & Dong, Z. (2019) Optimization of the mix proportion for desert sand concrete based on a statistical model. *Construction and Building Materials*, 226, pp. 469–482. [doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.07.287](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.287)
15. Moskalova K., Lyashenko T., Aniskin, A. (2022) Modelling the Relations of Rheological Characteristics with Composition of Plaster Mortar. *Materials*, 15(1), 371. DOI: 10.3390/ma15010371
16. Cornell J. A. (2002) Experiments with mixtures: Designs, models, and the analysis of mixture data. 3rd ed. New York : Wiley, 680 p.
17. Nécira B., Belkacem M. & Abadou Y. (2021) Statistical analysis of high performance self-compacting mortar containing ternary sand mixtures. *Materials Today: Proceedings*, 45. pp. 5166–5171. [doi:10.1016/j.matpr.2021.01.694](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.694)
18. Danilkovych A.G., Shakhnovsky A.M. (2020) Development of a filler-hydrophobic composition in the production of velor from nutria skins: experience of multi-criteria optimization. *Computer Modeling for Chemistry, Technologies and Sustainable Development Systems: Proceedings: Eight International Scientific-Practical Conference*. Kyiv, pp. 161–168.
19. Harrington E.C. (1965) The Desirability Function. *Industrial Quality Control*, 21(10). pp. 494–498.