

УДК691.32/34-033.33:51-047.58.

DOI 10.30837/bi.2022.1(98).04

Я.О. Ляшок¹, С.В. Подкопаєв², О.І. Повзун³, С.О. Вірич⁴, В.В. Калиниченко⁵¹Доктор економічних наук, професор, ректор, ДонНТУ, м. Луцьк, Україна
ORCID iD: 0000-0002-7643-8485²Доктор технічних наук, професор, проректор з наукової роботи,
ДонНТУ, м. Луцьк, Україна³Кандидат технічних наук, доцент, ДонНТУ, м. Луцьк, Україна
ORCID iD: 0000-0001-8183-9585, povzun.aleksey@gmail.com⁴Кандидат технічних наук, доцент, завідувачка кафедри, ДонНТУ, м. Луцьк, Україна⁵Кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри, ДонНТУ, м. Луцьк, Україна

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ ЗА ДОПОМОГОЮ СИМПЛЕКС-ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Проведено математичне й комп'ютерне дослідження технологічної системи – об'ємногідрофобізований ніздрюватий бетон автоклавного тверднення з кремнійорганічною поліметилсилоксановою добавкою (ПМС-100). За допомогою симплекс-планування експерименту показано, що взаємозв'язок між складом сировинної суміші, технологічними факторами, структурою та фізико-механічними властивостями ніздрюватого бетону описується моделями у вигляді планів другого порядку на гіперкубі відповідної розмірності. Для визначення дисперсії відтворюваності виконано триразове повторення дослідів при значеннях вхідних параметрів на нульових рівнях.

МОДЕЛЬ МАТЕМАТИЧНА, СИМПЛЕКС-ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ, ФАКТОР ВАРІЮВАННЯ, ПАРАМЕТР ОПТИМІЗАЦІЇ, БЕТОН

Yaroslav Liashok, Serhii Podkopaiev, Oleksii Povzun, Svitlana Virych, Valerii Kalynychenko. **Mathematical modeling of a technological system using simplex planning of the experiment.** Mathematical and computer research for optimization of the composition of bulk hydrophobized cellular concrete of autoclave hardening with silicone polymethylsiloxane additive PMS-100. Using simplex planning of the experiment it is shown that the relationship between the composition of the raw mixture, technological factors, structure and physical and mechanical properties of aerated concrete is described by models in the form of second-order plans on a hypercube of appropriate dimension. To determine the reproducibility variance, the experiments were repeated three times at the values of the input parameters at zero levels.

MATHEMATICAL MODEL, SIMPLEX EXPERIMENTAL PLANNING, VARIABLE FACTOR, OPTIMIZATION PARAMETER, CONCRETE

Вступ

Перспективним теплоефективним будівельним матеріалом є ніздрюватий бетон, частка виробів з якого в загальному обсязі стінових матеріалів нині становить 6-8%. За прогнозними даними обсягів розвитку житлового будівництва річна потреба у ніздрюватобетонних виробках зростає в 15 разів порівняно з існуючими обсягами його виробництва. Це пов'язано зі світовою тенденцією підвищення опору теплопередачі стінових конструкцій.

Розроблення нових технологій виробництва виробів з ніздрюватих бетонів дозволить виготовляти вироби, при застосуванні яких зовнішні огорожувальні конструкції будуть відповідати нормативному значенню опору теплопередачі — 1,7-2,2 м²·°C/Вт для різних кліматичних зон.

1. Постановка задачі

Необхідність економії матеріальних та енергетичних ресурсів при виробництві ніздрюватого бетону вимагає чіткого керування технологією, властивостями матеріалу та якістю готової продукції в цілому. Технологічний процес, що містить сукупність тісно пов'язаних між собою факторів, є складною статистичною системою.

Ефективний аналіз та дослідження об'єктів такого роду можливі на основі системного підходу, що передбачає побудову узагальненої моделі, яка б відбивала взаємозв'язки між елементами системи [1].

Однак за умов великої кількості факторів, що впливають на властивості матеріалу, практично неможливо розробити модель, здатну ефективно функціонувати для будь-якої технології та будь-якої сировини. У такому випадку задача зводиться до моделювання процесу одержання бетону на основі цементу, вапняно-кремнеземистого в'язучого, кремнеземистого компонента (мелений кварцовий пісок) та кремнійорганічної добавки.

2. Аналіз досліджень і публікацій

Засновниками використання системного підходу до вивчення технології ніздрюватих бетонів є О.О. Федін, Є.М. Чернишов та В.О. Вознесенський [2-6]. В роботі [5] детально наведено приклади застосування двофакторного ортогонального квадратного плану, двофакторного плану 3² для побудови неповних кубічних моделей, трифакторного некомпозиційного плану типу Бокса-Бенкіна, двофакторного симплекс-сумуючого плану (на прикладі введення в суміш мікродобавок — регуляторів якості

матеріалів для заощадження дефіцитного компонента), техніко-економічну інтерпретацію моделі і оцінювання впливу факторів на вихід (на прикладі для ніздрюватих композитів) тощо.

Для єдиного простору трьох рецептурно-технологічних факторів (РТФ) отримано 24 експериментально-статистичні моделі, що створюють два порівнювані комплекси: «структурні характеристики — РТФ» і «технічні властивості — РТФ», які відбивають закономірності впливу РТФ (складу ніздрюватобетонної суміші, виду газоутворювача і тривалості ізотермічної витримки) на характеристики структури і властивості матеріалу [7].

Запропонована розрахункова модель зводиться до розв'язання системи рівнянь, в яких міцність на стиск ніздрюватого бетону виражена як відношення максимального навантаження до площі елементарної несучої комірки. На підставі достовірної залежності міцності на стиск і її графічних ізоліній, одержаних при математичній обробці результатів експерименту, доведено, що визначальним фактором оптимізації є співвідношення між товщиною міжпорової перегородки і діаметром пор, яке для різних видів ніздрюватого бетону може становити 0,1-1,0. Моделювання свідчить про наявність у ніздрюватому бетоні псевдоніздрюватої крупнокапілярної, ніздрюватої капілярної однорідної або крупнопорової неоднорідної структури.

В роботі [9] за методом ортогонального центрального композиційного планування (з побудовою відповідних номограм) проведено чотирифакторний експеримент. Після статистичної комп'ютерної обробки експериментальних даних були одержані поліноміальні моделі другого порядку зміни міцності на стиск, середньої густини та коефіцієнта розм'якшення силікатних зразків. Виявлено оптимальні склади будівельних матеріалів автоклавного тверднення, проведено дослідження впливу окремих компонентів і режимів автоклавної обробки на їх технологічні та фізико-механічні властивості [9].

3. Формулювання цілі та завдань дослідження

Теоретичні узагальнення і прикладні розв'язання питань науково-інженерної проблеми управління технологічними процесами і якістю будівельних матеріалів становлять нині одне з найактуальніших напрямків досліджень. З розробленням цього напрямку пов'язані умови і перспективи «наукового володіння виробництвом» і можливості переходу виробництва на принципи оптимальності хіміко-технологічних рішень за критеріями матеріало- та енергоємності одержання будівельних матеріалів, виробів, конструкцій. По суті йдеться про створення цілісної системи управління технологією і якістю продукції, що являє собою багатопланову задачу, центральною частиною якої є розкриття фізико-механічної, механо-хімічної сутності формування якості продукції шляхом її оптимізації.

Метою роботи є за допомогою математичного моделювання і оптимізації залежності зміни фізико-механічних властивостей від технологічних параметрів автоклавного тверднення одержання високоефективного ресурсоекономічного об'ємногідрофобізованого ніздрюватого бетону.

Використовуючи комп'ютерні програми оптимізаційного конструювання будівельних композитів, завданнями дослідження є:

1. Розробити математичну модель
2. Побудувати номограми залежностей параметрів оптимізації системи від факторів варіювання
3. Визначити оптимальний склад ніздрюватого бетону

4. Викладення основного матеріалу досліджень

Як об'єкти дослідження прийнято:

- кремнеземистий компонент – мелений кварцовий пісок;
- портландцемент марки М500;
- вапно комове негашене за ДСТУ Б В.2.7-90:2011;
- кремнійорганічна добавка – поліметилсилоксанова (ПМС-100);
- вода за ДСТУ Б В.2.7-273:2011;
- газоутворювач – пудра алюмінієва пігментна (ПАП-1).

Для вивчення взаємозв'язку між технологічними факторами, структурою та властивостями ніздрюватого бетону автоклавного тверднення було застосовано симплекс-планування експерименту. Цей взаємозв'язок описується моделями у вигляді планів другого порядку на гіперкубі відповідної розмірності [5].

Відповідно до алгоритму симплексного методу [10] експериментальне визначення оптимальних значень цільової функції здійснювали за такою послідовністю:

1) обирали цільову функцію, інтервали варіювання, інтервали факторів варіювання і виконували кодування факторів;

2) уточнювали план експерименту, тобто обчислювали координати початкового симплекса. Кількість дослідів $N = k + 1$;

3) проводили відповідні досліди за планом експерименту;

4) упорядковували відгуки згідно зі ступенем їх зменшення і виділяли найменше значення відгуку Y_{imin} , яке потім відкидали;

5) будували новий симплекс. Він утворюється вершинами, що залишилися, вихідного симплекса і новою вершиною, яка виходить шляхом дзеркального відбиття відкинутої відносно протилежної грані вихідного симплекса. Координати нової точки x обчислювали за формулою:

$$x^* = \frac{2}{k} (x^1 + x^2 + \dots + x^{i-1} + x^{i+1} + \dots + x^{k+1}) - x^i = \frac{2}{k} \sum_{i=1}^{k+1} x^i - \left(\frac{2}{k} + 1 \right) x^i \quad (1)$$

де x^i – координати вершини вихідного симплекса з найменшим значенням цільової функції.

Побудова плану у вигляді симплекса дозволяє визначити (передбачити) відгук у новій вершині x^* :

$$\hat{y}^* = \frac{2}{k} \sum_{i=1}^{k+1} \hat{y}^i - \left(\frac{2}{k} + 1 \right) \hat{y}^i \quad (2)$$

6) проводили експеримент у новій точці x^* і одержували експериментальне значення y^* цільової функції;

7) послідовно переміщували симплекс, під час чого на кожному кроці відбувалось скидання вершини симплекса з найменшим значенням цільової функції і реалізація досліду у новій вершині. При цьому напрямок руху співпадає з направленням градієнта.

Рівні варіювання технологічних факторів призначали на основі попередньо проведених однофакторних експериментів. Результати експериментів обробляли методами математичної статистики [11], [12]. Побудову поліноміальних моделей здійснювали за методом повного перебору, що дозволяло серед множини можливих (при заданій структурі) обрати найкращу модель за критерієм Фішера. Довірчі інтервали оцінок отриманих результатів визначали на основі результатів випробувань малих вибірок із застосуванням розподілу Стюдента при надійності, що дорівнювала 0,95. Для обчислення дисперсії відтворюваності виконано триразове повторення дослідів при значеннях вхідних параметрів на нульових рівнях. Однорідність дисперсій перевіряли за критерієм Кохрена. Адекватність моделі перевіряли за критерієм Фішера.

Для систем, що є сумішами різних компонентів, змінні x_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) є пропорціями (відносним вмістом) компонентів суміші та задовольняють умові:

$$\sum_{1 \leq i \leq n} x_i = 1 \quad (3)$$

Геометричне місце точок, що задовольняють умові нормованості суми змінних (3), являє собою $(n-1)$ -мірний правильний симплекс (трикутник для $n=3$, тетраedr для $n=4$ тощо). Кожній точці такого симплекса відповідає суміш визначеного складу і, навпаки, будь-якій комбінації відносних вмістів компонентів відповідає визначена точка симплекса.

Координати компонентів визначали у симплексній системі координат, в якій відносні вмісти кожного компонента відкладаються вздовж відповідних сторін (граней) симплекса від 0 до 1. Отримані апроксимуючі моделі можуть бути використані для передбачення відгуків в будь-якій точці симплексу. Точність передбачення відгуку в різних точках симплексу різна і окрім координат точки залежить від екстремальної ситуації (дисперсії досліду, кількості паралельних спостережень у вузлах симплексної ґратки).

Для підбору та моделювання рецептур ніздрюватобетонної суміші проведено підготовку сировинних компонентів, що включала здрібнення і усереднення складових, підігрів води і приготування водно-алюмінієвої суспензії.

Вплив широкого діапазону концентрацій кремнійорганічної поліметилсилоксанової добавки ПМС-100 на міцність ніздрюватого бетону на стиск визначали на зразках-кубах $100 \times 100 \times 100$ мм. Зразки були виготовлені згідно з вимогами [13] з бетонної суміші рецептури (Цемент : Вапно : Пісок) $1 : 0,61 : 0,89$. Рухомість суміші за Суттардом [14], [15] – 14 ± 2 см. Зразки витримували в формах до автоклавної обробки впродовж 12 годин, після чого запарювали в лабораторному автоклаві місткістю $0,07 \text{ м}^3$ за режимом: прогрів та підйом тиску пари до 1 МПа – 3 години; витримування при тиску пари 1 МПа – 6 годин; зниження тиску пари за рахунок природного охолодження.

З метою моделювання складу ніздрюватобетонної суміші (табл. 1) проведено аналіз процесів синтезу гідросилікатів з використанням розробленої теоретичної моделі. Кремнійорганічну поліметилсилоксанову добавку ПМС-100 приймаємо в розрахунок як високоактивний кремнеземистий компонент, вважаючи, що присутність органічної складової добавки не впливає суттєво на склад новоутворень. Коефіцієнт гідралічної активності добавки ПМС-100 приймемо 0,5, а для піску 0,035.

Таблиця 1

Витрата компонентів ніздрюватобетонної суміші для виготовлення бетону густиною 400 кг/м^3

Витрата компонентів на 1 м^3 , кг					
вапно	цемент	кремнеземистий компонент	вода	добавка	алюмінієва пудра
95,28	155,64	138,17	155	7,8	0,55

Збільшення вмісту добавки ПМС-100 понад 2% спричиняє зниження міцності готових виробів. Однією з можливих причин такого явища є понадоптимальна автоклавна обробка (тобто, починаючи з 10-ї години новоутворення перекристалізуються та укрупнюються, що викликає порушення структури). Іншою – утворення лінз гідрофобізатора, що спричиняють розклинюючу дію та викликають порушення зв'язків між новоутвореннями.

Досліджувана добавка ПМС-100 фактично реагує вже на стадії змішування, формування та доавтоклавної витримки. Тому доречним стало розглянути розрахунок синтезу за умови, що добавка на початок синтезу (тобто в 0 годин) повністю переходить у новоутворення. Оптимальні склади високоефективного ресурсоекономічного об'ємногідрофобізованого ніздрюватого бетону визначали як оптимальні області допустимих значень факторів варіювання X_1, X_2, X_3 (табл. 2).

Таблиця 2

Значення факторів варіювання

Система		Фізичний зміст фактора варіювання		
		Вміст портланд-цементу, кг	Вміст вапна, кг	Вміст добавки ПМС-100, кг
		X_1	X_2	X_3
Ніздрюватий бетон	Інтервал варіювання	10	20	1
	Рівні фактора у кодіваних числах	-1	0	+1
		120	130	140
		40	60	80
		1	2	3

Ці оптимальні області обмежені поверхнями рівня функції відгуку за кожним з параметрів оптимізації (табл. 3).

Матриця планування експерименту і отримані значення параметрів оптимізації надані в табл. 4.

За критерій оптимальності плану прийнято критерій D -оптимальності, який пов'язаний з мінімізацією об'єму еліпсоїду розсіювання оцінок параметрів рівнянь регресії [16]. Для створеного плану експерименту за методом найменших квадратів обчислено коефіцієнти рівнянь регресії за виразом [17]:

$$b_i = (X^* \cdot X)^{-1} \cdot X^* \cdot Y,$$

де b_i – коефіцієнт рівняння регресії; X – матриця плану експерименту; X^* – транспонована матриця плану експерименту; $(X^* \cdot X)^{-1}$ – матриця, обернена до добутку матриці плану експерименту на його транспоновану матрицю; Y – вектор-стовпець результатів експерименту.

За планом з однією центральною точкою досліджено 15 сумішей (табл. 4).

Таблиця 3

Параметри оптимізації системи

№ з.п.	Код параметра оптимізації	Фізичний зміст параметра оптимізації	Граничні значення функції відгуку
1	Y_1	Міцність на стиск бетону, $\sigma_{ст}$, МПа	2,90; 3,27
2	Y_2	Морозостійкість бетону, F , цикли	> 25; > 25
3	Y_3	Водопоглинання бетону, W , %	<8; < 8
4	Y_4	Середня густина бетону, ρ_0 , кг/м ³	351; 449

Сировинну суміш готували шляхом спільного перемішування цементу, вапняно-кремнеземистого в'язучого, кварцового піску, води, добавки ПМС-100 та водної суспензії алюмінієвої пудри (ПАП-1) та поверхнево-активної речовини (ПАР).

Вапняно-кремнеземисте в'язуче готували спільним помелом вапна та піску у співвідношенні 1:1,8 до питомої поверхні 550 м²/кг. Активність вапняно-кремнеземистого в'язучого становила 44%.

Суспензію газоутворювача готували при інтенсивному перемішуванні алюмінієвої пудри ПАП-1 з водою при температурі 60-65 °С. Витрата ПАП-1 від 0,2% до 0,6% від маси сухих компонентів.

У всіх точках плану прийнято витрату води, що забезпечує рухомість суміші на віскозиметрі Суттарда 16 см. При цьому водотверде відношення змінювалося у межах 0,4-0,5.

Обробка результатів експерименту і обчислення коефіцієнтів рівнянь регресії з урахуванням їх значущості дозволили одержати поліноміальні моделі.

Статистичний аналіз отриманих результатів містить перевірку двох статистичних гіпотез:

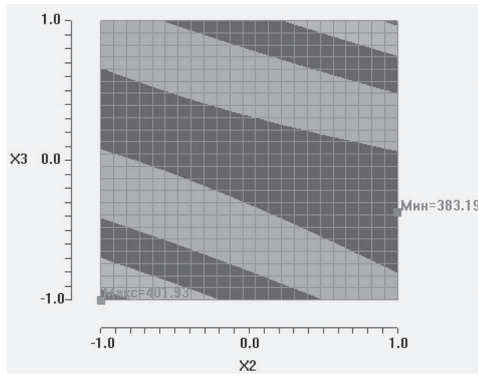
Таблиця 4

Матриця планування та результати експерименту

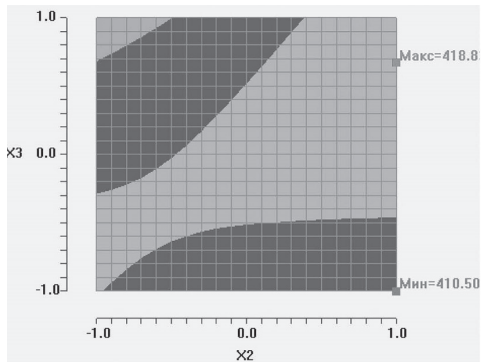
№	План			Результат							
	X_1	X_2	X_3	Y_1		Y_2		Y_3		Y_4	
				Y_{11}	Y_{12}	Y_{21}	Y_{22}	Y_{31}	Y_{32}	Y_{41}	Y_{42}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-1	-1	-1	20,8	26,1	19	21	5,0	5,8	412	420
2	-1	-1	+1	26,2	28,1	20	22	0,8	1,2	380	392
3	-1	+1	-1	22,0	24,1	20	24	4,9	5,6	386	408
4	+1	-1	-1	21,8	23,6	20	22	5,1	5,8	404	412
5	-1	+1	+1	24,6	26,2	20	22	0,8	1,4	410	418
6	+1	-1	+1	21,0	22,8	19	20	1,0	1,3	398	420
7	+1	+1	-1	22,6	26,8	21	23	4,6	4,8	402	414
8	+1	+1	+1	29,1	32,1	21	24	0,8	1,2	396	416
9	+1	0	0	34,1	36,2	26	30	1,2	1,9	380	410
10	-1	0	0	36,1	38,2	24	26	1,9	2,2	390	420
11	0	+1	0	32,0	34,0	25	30	1,4	2,1	380	420
12	0	-1	0	31,8	35,1	27	31	1,7	2,2	385	415
13	0	0	+1	28,1	32,1	22	26	1,0	1,3	402	412
14	0	0	-1	27,4	32,6	20	21	4,2	5,0	380	416
15	0	0	0	32,6	34,1	24	28	1,6	2,4	394	414
Норматив				28,97	32,74	>25	>25	<8	<8	351	449

- про значущість отриманих коефіцієнтів моделі;
- про адекватність представлення результатів експерименту здобутим рівнянням регресії.

Результати розрахунку математичної моделі з подальшим регресійним аналізом наведено на рис. 1 – рис. 4.

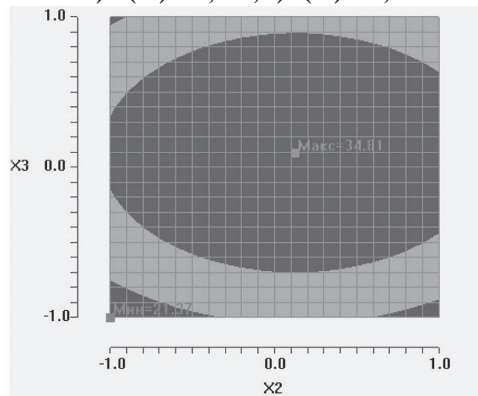


а

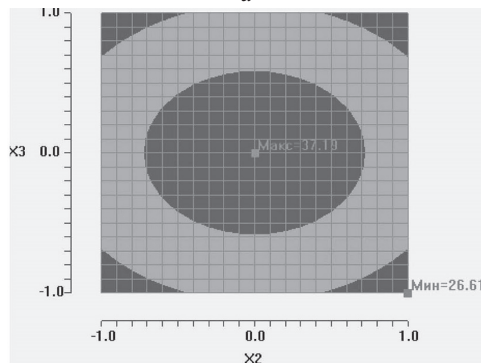


б

Рис. 1. Номограма залежності функції відгуку (середня густина ніздрюватого бетону ρ_0) від вмісту вапна і вмісту добавки ПМС-100 а) – $(tS)e=2,517$; б) – $(tS)e=6,0$

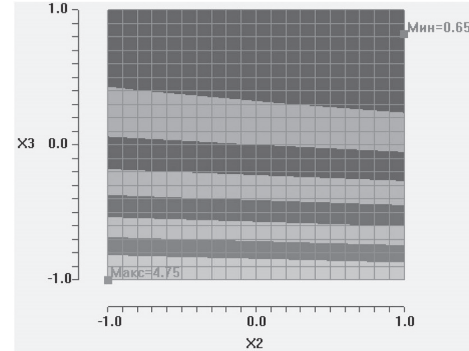


а

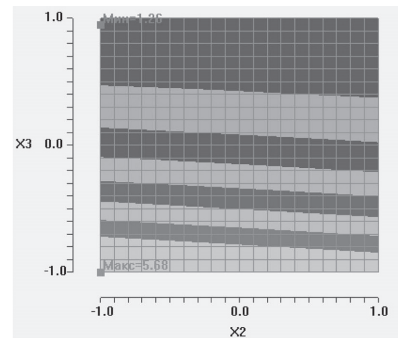


б

Рис. 2. Номограма залежності функції відгуку (міцність ніздрюватого бетону на тиск $\sigma_{ст}$) від вмісту вапна і вмісту добавки ПМС-100 а) – $(tS)e=2,517$; б) – $(tS)e=2,79$

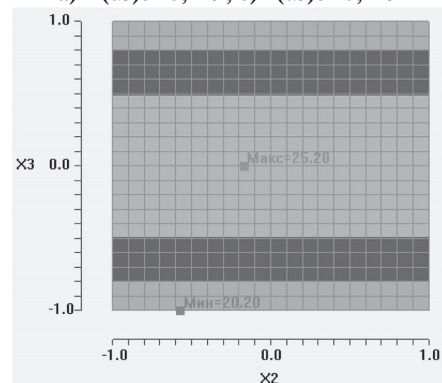


а

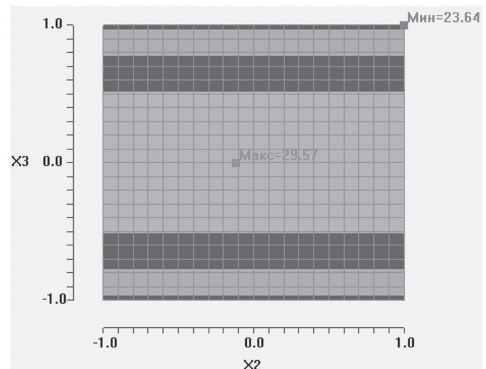


б

Рис. 3. Номограма залежності функції відгуку (водопоглинання ніздрюватого бетону) від вмісту вапна і вмісту добавки ПМС-100 а) – $(tS)e=0,229$; б) – $(tS)e=0,279$



а



б

Рис. 4. Номограма залежності функції відгуку (морозостійкість ніздрюватого бетону F) від вмісту вапна і вмісту добавки ПМС-100 а) – $(tS)e=2,027$; б) – $(tS)e=2,280$

На основі аналізу результатів експерименту встановлено оптимальний склад сировинної суміші для автоклавного об'ємногідрофобізованого ніздрювато-го бетону, що забезпечує підвищені фізико-механічні характеристики (табл. 5).

Таблиця 5

Оптимальний склад ніздрювато-го бетону

Компонент	Вміст, % від маси сухих
Портландцемент	140 кг (35%)
Вапно	60 кг (15%)
Пісок кварцовий	189 кг (47,25%)
Добавка ПМС-100	2%
Газоутворювач	0,55%
Поверхнево-активна речовина	0,2%

Висновки та напрямок подальших досліджень

На підставі розробленої математичної моделі за допомогою симплекс-планування експерименту ніздрюватий бетон оптимального складу характеризується підвищеною якістю.

За вмісту 2% (від маси сухих компонентів) кремнійорганічної поліметилсилоксанової добавки (ПМС-100) фізико-механічні властивості досліджуваного ніздрювато-го бетону є такими:

- середня густина – 400 кг/м³;
- міцність на стиск – 2,9 МПа;
- морозостійкість – 25 циклів поперемінного заморожування–відтавання;
- водопоглинання – < 5%.

Подальші роботи будуть присвячені впровадженню результатів наукових досліджень у виробництво (випуск дослідно-промислової партії об'ємногідрофобізованого ніздрювато-го бетону автоклавного тверднення).

Список літератури:

- [1] Коверніченко Л.М., Хільченко О.П. Штучні будівельні матеріали // Вісник Криворізького національного університету. – 2019. – Вип. 48. – С. 111-114.
- [2] Федин А.А., Чернышов Е.М. Влияние состава сырьевой шихты на структуру цементирующих веществ и физико-механические свойства силикатного ячеистого бетона // Исследования по цементным и силикатным бетонам. – Воронеж: ВГУ, 1970 – Вып. 4. – С.15-29.
- [3] Чернышов Е.М. Статистический анализ структуры силикатных автоклавных материалов и его приложения к изучению свойств, определяющих стойкость // Долговечность конструкций из автоклавных бетонов. – Таллин: Валгус, 1981. – Ч.1. – С. 14-18.
- [4] Методические рекомендации по составлению технического задания на моделирование рецептурно-технологических свойств строительных материалов и изделий / В.А. Вознесенский, И.Б. Удачкин, Б.Л. Огарков и др. – К.: 1981. – 57 с.
- [5] Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях 2-е изд. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 263 с.
- [6] Вознесенский В.А. Оптимизация состава многокомпонентных добавок и композитов. – К.: Знание, 1981. – 20 с.
- [7] Шинкевич Е.С. Оптимизация структуры ячеистого силикатного бетона по комплексу критериев качества на основе изопараметрического анализа: дис. к-та техн. наук: – Елена Святославовна Шинкевич. – Воронеж. – 1985. – 239 с.
- [8] Королев А.С. Оптимизация состава и структуры конструкционно-теплоизоляционного ячеистого бетона / А.С. Королев, Е.А. Волошин, Б.Я. Трофимов // Строительные материалы. – 2004. – № 4. – С. 30-32.
- [9] Володченко А.Н. Оптимизация свойств силикатных материалов на основе известково-песчано-глинистого вяжущего / А.Н. Володченко, Р.В. Жуков, В.С. Лесовик, Е.А. Дороганов // Строительные материалы. – 2007. – №4. – С. 66-68.
- [10] Кононюк Е.А. Основы научных исследований (Общая теория эксперимента) / Е.А. Кононюк, Книга 3. – Монография. – К.: Освіта України. – 2011. – 456 с.
- [11] Кожухова Н.И. Теоретические основы планирования, проведения и обработки эксперимента / Н.И. Кожухова. – 2019. – 76 с.
- [12] Солодов В.С. Практикум по планированию, проведению и обработке эксперимента в исследовании технологических процессов / В.С. Солодов. – 2018. – 150 с.
- [13] ДСТУ-Н Б В.2.7-308:2015. Настанова з виготовлення виробів з ніздрювато-го бетону. [Чинний від 01.10.2016]. Київ: Мінбуд України, 2016. 52 с.
- [14] Дворкін Л.Й., Житковський В.В. Технологія опоряджувальних, теплоізоляційних та гідроізоляційних матеріалів: навч. посіб / Л.Й. Дворкін, В.В. Житковський. – Рівне: НУВГП. – 2010. – 227 с.
- [15] ДСТУ Б В. 2.7 - 82 :2010. В'язучі гіпсові. Технічні умови. [Чинний від 01.03.2011]. Київ: Мінбуд України. – 2011. – 29 с.
- [16] Голикова Т.И. Свойства D-оптимальных планов и методы их построения / Т.И. Голикова, Н.Г. Микешина // Новые идеи в планировании эксперимента. – М.: 1969. – С. 34-39.
- [17] Кафаров В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии / В.В. Кафаров. – М.:Химия, 1971. – 496 с.

Надійшла до редколегії 21.06 2022