

УДК 622.279.5

https://doi.org/10.31996/mru.2021.4.*-

В. М. ОРЛОВСЬКИЙ, канд. техн. наук, доцент (Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова), svaroh13@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-8749-5354>,

В. С. БІЛЕЦЬКИЙ, д-р техн. наук, професор (Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"), biletisk@i.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2936-9680>,

А. В. МЕЛЕЖИК, здобувач вищої освіти (Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова), lina.melehik@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9205-1352>

V. ORLOVSKIY, PhD (Engin.), Associate Professor (O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv), svaroh13@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-8749-5354>,

V. BILETSKYI, Dr. Sci. (Engin.), Professor (National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"), biletisk@i.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2936-9680>,

A. MELEZHNIK, higher education seeker (O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv), lina.melehik@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9205-1352>

МОДЕЛЮВАННЯ ТАМПОНАЖНОГО КАМЕНЮ НА ЦЕМЕНТНО-ЗОЛЬНІЙ ОСНОВІ

SIMULATION OF CEMENT-ASH STONE FOR WELLS

У цій праці автори мають на меті одержати статистичну математичну модель цементно-зольного тампонажного каменю з функцією відгуку – міцність каменю. Зокрема, сформульовано задачу щодо встановлення впливу на міцність тампонажного каменю домішки у вигляді кислоти золи-виносу теплових електростанцій (пуцоланова домішка).

Методи дослідження. Для одержання статистичної моделі використано ротатбельний центральнокмпозиційний план експерименту. Результати оброблено із застосуванням методу комп'ютерного математичного моделювання за допомогою системи STATGRAPHICS Plus for Windows.

Наукова новизна. З'ясовано, що гіперповерхня $G(X_1, X_2)$ має точку екстремуму. Це дає змогу оптимізувати за факторами X_1, X_2 склад тампонажної суміші.

Практична значущість. Отримані результати дають можливість прогнозувати міцнісні характеристики каменю на основі цементно-зольного складу.

Результати. Одержано статистичну математичну модель цементно-зольного каменю на основі цементу загальнобудівельного призначення марки ПЦІ-500-Н. За отриманими Парето-графіком, гіперповерхнями й контурними кривими визначено характер і ступінь впливу кожного з членів полінома на цільову функцію – міцність цементного каменю $G(X_1, X_2, X_3)$. Найбільшу статистичну значущість мають фактори моделі X_1, X_3 , фактор X_2 є статистично найменш значущим. Результати моделювання підтверджують, що водосумішеве співвідношення не має значного впливу на міцність тампонажного каменю в заданому діапазоні рецептур.

Максимальна міцність тампонажного каменю $G = 13,582$ МПа має місце в точці оптимуму з координатами: $X_1 = 0,689$; $X_2 = -0,295$; $X_3 = 1,105$.

Ключові слова: тампонажний матеріал, ротатбельний центральнокмпозиційний план експерименту, моделювання, Парето-графік, поверхні відгуку, рівняння регресії.

Purpose. The purpose of this work is to obtain a statistical mathematical model of cement-ash stone with the response function – the strength of the stone. In particular, the task is to establish the effect on the strength of cement stone additives in the form of ash-removal of thermal power plants (pozzolanic additive).

Methodology. A rotatable central composition plan of the experiment was used to obtain a statistical model. The results were processed using the method of computer mathematical modeling using the system STATGRAPHICS Plus for Windows.

Originality. It is established that the hypersurface $G(X_1, X_2)$ has an extremum point, which allows to optimize the composition of the cement mixture by factors X_1, X_2 .

Practical value. The results obtained in this work make it possible to predict the strength characteristics of the stone on the basis of cement-ash composition.

Finding. The statistical mathematical model of cement-ash stone on the basis of cement of general construction purpose of the ПЦІ-500-Н brand is received. From the obtained pareto-graphs, hypersurfaces and contour curves, the nature and degree of influence of each of the polynomial members on the objective function – the strength of cement stone $G(X_1, X_2, X_3)$ are determined. The factors of model X_1, X_3 have the greatest statistical significance, the factor X_2 is statically the least significant. The simulation results confirm that the water-mixture ratio does not have a significant effect on the strength of cement stone in a given range of formulations.

The maximum strength of cement stone $G = 13,582$ МПа takes place at the optimum point with coordinates: $X_1 = 0,689$; $X_2 = -0,295$; $X_3 = 1,105$.

Keywords: cement material, rotatable central composition plan of experiment, strength modeling, Pareto-graph, response surfaces, regression equation.

Вступ. Питання моделювання в нафтогазовій промисловості доцільно розглядати в плані основних об'єктів та технологічних процесів і пристроїв, які використовуються під час буріння, видобування, транспортування та зберігання, а також первинного й вторинного перероблення вуглеводневих флюїдів. Сьогодні в процесі цементування свердловин на бурових підприємствах України використовують переважно

стандартний тампонажний портландцемент ПЦІ-100, цементно-зольні суміші (ЦЗС) на базі тампонажного портландцементу ПЦІ-100 і золи кислоти (ЗК) теплових електростанцій, будівельний портландцемент ПЦІ-500-Н та спецементи ШПЦС-120, ШПЦС-200, ПЦІІІ-Пол 5-100, ЦТП 1,5-100, ЦТО-100, ОШЦ [7, 8].

Упродовж останніх десятиріч нафтові й газові свердловини досягли великих глибин, тому виникла потреба в застосуванні термостійких тампонажних матеріалів.

Основні дослідження і публікації. На сьогодні для якісного розмежування пластів у нафтових і газових свердловинах застосовують переважно тампонажні цементи, у яких основним в'язучим матеріалом є портландцемент. Згідно з ДСТУ БВ.2.7-88-99, залежно від хіміко-мінералогічного складу, тампонажні портландцементи поділяють на класи для різних температурних умов експлуатації від 288 до 423 К.

Результати досліджень [1, 5] засвідчили, що в разі застосування портландцементів у геотермальних умовах глибоких свердловин виникають проблеми довговічності тампонажного каменю. Висока активність портландцементу спричинює температурну нестабільність тампонажного каменю, що викликає деструктивні процеси, зокрема утворення високоосновного гідросилікату, внаслідок чого поступово знижується міцність і підвищується проникність, навіть у термостійких цементів. Це призводить до формування шляхів газонафтоводопроявів (ГНВП) і перетоків у свердловині.

У процесі перероблення кам'яного вугілля на теплову енергію утворюється велика кількість відходів. Ці відходи за фізичним станом речовини можна поділити на три головні типи [8]:

- зола – сипка тонкодисперсна маса, яка складається з неоплавлених або оплавлених на поверхні дрібних зерен, що утворюються за порівняно низьких температур;

- шлак котельний – спечена, порувата, досить міцна маса, що складається з окремих шматків неправильної форми розміром 0,01–0,20 м та утворюється переважно на колосниковій решітці за температур, вищих від 1 273 К;

- шлак, що утворюється після охолодження розплавленої за вищої від 1 573 К температури мінеральної частини палива – цільна (з високою міцністю) склувата або закристалізована маса.

Для використання як тампонажних матеріалів найпридатніші тонкодисперсні золи, що не потребують додаткових технологічних витрат, зокрема розмелювання. Тому для кріплення свердловин запропоновано розробку – термостійкі тампонажні суміші на основі портландцементу загальнобудівельного призначення (ПЦЗБП), зокрема портландцементу ПЦІ-500-Н з кислою золою-виносом теплових електростанцій (ТЕС) [15].

Під час дослідження технологічних властивостей розроблених композицій на основі сумішей ПЦЗБП з кислою золою-виносом ТЕС встановлено таке:

- на основі сумішей ПЦЗБП з кислою золою-виносом, наприклад Курахівської ДРЕС, можна одержати термостійкі тампонажні композиції з високими експлуатаційними властивостями;

- одержаний камінь на основі сумішей ПЦЗБП з кислою золою-виносом ТЕС має високу стійкість в умовах сульфатної і магнезійної агресії (особливо рецептури, які містять шлакопортландцемент) [15].

Досліджуючи процеси твердіння й деструкції цементного каменю під час тривалої гідротермальної дії В. С. Данюшевський зробив висновок про важливе значення природи утворення тієї чи іншої структуротвірної фази для властивостей тампонажного каменю, зокрема його термостійкості [9].

Таблиця 1. Область факторного планування

Фактор	Код фактора	Одиниця вимірювання	Рівні факторів				
			–1,68179	–1	0	1	1,68179
Вміст портландцементу ПЦІ-500-Н у тампонажній суміші	X1	%	40	45	50	55	60
Водосумішеве співвідношення	X2	%	0,55	0,555	0,56	0,565	0,57
Температура	X3	°C, (K)	80 (353,15)	90 (363,15)	100 (375,15)	110 (353,15)	120 (393,15)

Водночас виокремлюються два можливі напрями в одержанні стійких новоутворень на ранніх стадіях твердіння.

Перший з цих напрямів полягає у виборі в'язучого матеріалу з найменшою, але достатньою для забезпечення потрібної швидкості твердіння хімічною активністю. Другий напрям передбачає утворення в реакції зі спеціально введеними кремнеземом і глиноземом довговічних в умовах високих температур і тисків гідросилікатів і гідрогранатів кальцію.

Практичне вирішення цього питання пов'язане з розробленням тампонажних композицій, до складу яких входять малоактивні в'язучі матеріали та різні домішки до них, що наявні у відходах металургійної, гірничорудної й хімічної промисловості. Це шлаки, шлами, спіки, розплави, золи, горілі породи тощо [16].

На сьогодні найповніше досліджено можливості використання зол горючих сланців, кам'яного й бурого вугілля. Їхне застосування розвивається в трьох головних напрямках: використання зол як сировинного компонента під час одержання клінкеру [2, 10, 14, 17], використання як активної мінеральної домішки до цементів [6, 11, 13, 17], у виробництві будівельних деталей під час автоклавного оброблення з використанням в'язучих властивостей золи [3, 4, 12].

У Полтавському відділенні УкрДГРІ розроблено безклінкерні термостійкі тампонажні цементи на основі сумішей, як-от висококальцієва зола (ЗВ) Прибалтійських горючих сланців і кислої золи-виносу (ЗК) теплових електростанцій (ТЕС), наприклад Курахівської ДРЕС.

Мета цієї роботи – одержати статистичну математичну модель цементно-золяного тампонажного каменю з функцією відгуку – міцність каменю. Зокрема, сформульовано задачу щодо встановлення впливу на міцність тампонажного каменю домішки у вигляді кислої золи-виносу теплових електростанцій (пуцоланова домішка).

Постанова задачі. Головне завдання дослідження – одержання статистичної моделі тампонажно-золяного каменю дводобового тужавіння, на основі цементу ПЦІ-500-Н з функцією відгуку – міцність каменю.

Викладення основного матеріалу та результати. Для розроблення статистичної моделі застосовано ротатбельний центральнокпозиційний план експерименту, що забезпечує однакову похибку по всьому факторному просторі. Функція відгуку – міцність утвореного цементного каменю на стиснення через дві доби від початку тужавіння тампонажного розчину (G, МПа). На підставі апріорних даних варіативними вибрано три основні фактори: співвідношення вмісту портландцементу ПЦІ-500-Н у тампонажній суміші (X_1), водосумішеве співвідношення (X_2), умови тужавіння тампонажного розчину (температура за відповідних їй пластових тисків у свердловині) (X_3). Вибрані фактори відповідають вимогам керованості, взаємнезалежності, однозначності, яким мають задовольняти вхідні фактори під час планування експерименту. Зону факторного простору представлено в табл. 1.

За допомогою комп'ютерної програми STATGRAPHICS Plus for Windows отримано план-матрицю експерименту, втіленого в лабораторних умовах (табл. 2).

Результати лабораторних досліджень оброблено з використанням комп'ютерної системи STATGRAPHICS Plus for Windows. На рис. 1 представлено Парето-графік і графік порівняння розрахункових та експериментальних даних. Коефіцієнт детермінації $R^2 = 97,847\%$, показник втрат узгодженості функції Lack-of-fit $P = 0,0009$, а стандартна помилка оцінки $SE = 0,338$, що свідчить про адекватність регресійної моделі.

На рис. 1б показано взаємозв'язок одержаних і розрахункових даних. Основна частина експериментальних точок міститься в околиці прямої, і це ще раз побічно підтверджує висновок про адекватність моделі.

З Парето-графіка (рис. 1а) видно, що при 95 % довірчої ймовірності статистичну значущість мають фактори моделі X_1, X_3 , фактор X_2 є статично найменш значущим. Тобто, аналітично підтверджується, що водосумішеве співвідношення не має істотного впливу на міцність тампонажного каменю в заданому діапазоні рецептур.

У загальному вигляді отримано таке рівняння регресії:

$$G = 9,14305 + 0,680973 \cdot X_1 - 0,290528 \cdot X_2 + 1,105 \cdot X_3 - 0,280696 \cdot X_1^2 + 0,0875 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,2 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,215288 \cdot X_2^2 - 0,075 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,567835 \quad (1)$$

З огляду на значущість коефіцієнтів рівняння регресії при 95 % довірчої ймовірності рівняння (1) набуває вигляду:

$$G = 9,14305 + 0,680973 \cdot X_1 + 1,105 \cdot X_3 - 0,280696 \cdot X_1^2 + 0,2 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,567835 \cdot X_3^2 \quad (2)$$

На рис. 2 показано тривимірні перетини цільової функції $G(X_1, X_2, X_3)$ та відповідні контурні криві.

Отже, аналізуючи Парето-графік (рис. 1а) та рівняння регресії (2) констатуємо, що найбільш значущим для визначення цільової функції $G(X_1, X_2, X_3)$ є фактори X_1 – вміст у суміші портландцементу ПЦІ-500-Н та X_3 – умови тужавіння тампонажного розчину (температура при відповідних їй пластичних тисках у свердловині).

За значущістю члени моделі-полінома розміщуються в такому порядку: $X_3, X_1, X_3^2, X_2, X_1^2$.

Згідно з одержаними гіперповерхнями й контурними кривими рис. 2, збільшення фактора X_3 – температури ту-

жавіння тампонажної суміші зумовлює збільшення міцності тампонажного каменю, до того ж спершу спостерігається стрімке зростання цільової функції до певної точки. Отримана залежність з погляду фізики пояснюється тим, що з підвищенням температури величина пересичення розчинів гідратних новоутворень збільшується.

Критичний радіус зародків твердої фази зменшується. Внаслідок цього кількість контактів зрощування мікрористалів зростає, і вони в результаті втрати надлишкової води та інтенсивного обростання новими гідратними утвореннями зміцнюються. Відповідно зростає міцність кристалічної решітки цементного каменю. Але в рецептурах золотих термостійких тампонажних композицій з максимальним вмістом кислотої золи (55–60 %) прямо пропорційна залежність міцності від впливу умов тужавіння цементу спостерігається до певного критичного значення температури. Це зумовлено особливістю гідратації золотих сумішей. За високих температур (100 °C і вищих) гідратні новоутворення таких композицій стають термодинамічно нестійкими.

За гіперповерхнями простежується зростання залежності $G(X_1)$ для майже будь-яких значень фактора X_2 . Це свідчить про значущість фактора вмісту золи (X_1) і меншу значущість фактора водосумішевого відношення (X_2), що підтверджується Парето-графіком.

З погляду фізики вплив водосумішевого відношення пояснюється тим, що надлишкова вода під час змішування не бере участі в гідратації портландцементних зерен і залишається у вигляді вільної води, що й призводить до зниження міцності.

Як бачимо з аналізу гіперповерхні $G(X_2, X_3)$, міцність каменю експоненційно залежить від температури (фактор X_3). Водночас, як і в разі гіперповерхні $G(X_2, X_1)$, фактор X_2 менш значущий.

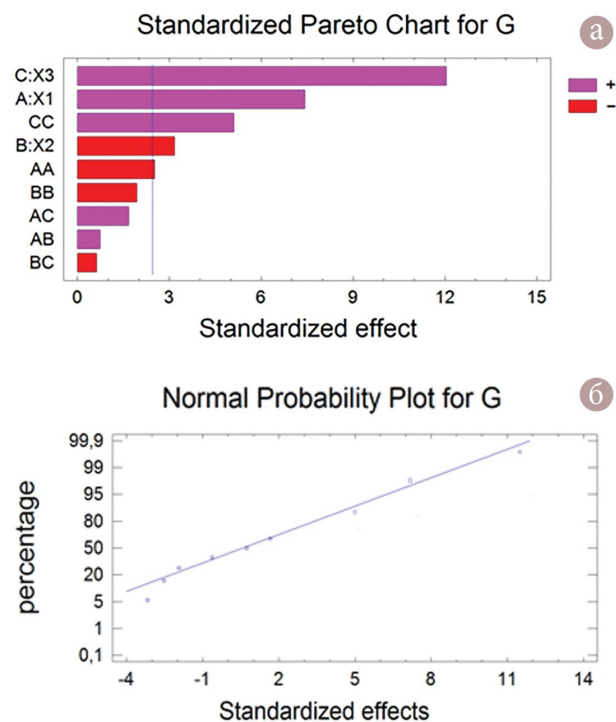


Рис. 1. Статистичні оцінки регресійної моделі

а) Парето-графік (вертикальна лінія відповідає 95 % значущості коефіцієнтів);

б) графік порівняння експериментальних (observed) і розрахункових (predicted) значень цільової функції

Таблиця 2. Матриця планування експерименту та одержані експериментальні дані

X1	X2	X3	G, МПа
-1	-1	-1	7,75
1	-1	-1	8,5
-1	1	-1	7,15
1	1	-1	8,4
-1	-1	1	9,6
1	-1	1	11,3
-1	1	1	8,85
1	1	1	10,75
-1,68179	0	0	7,5
1,68179	0	0	9,7
0	-1,68179	0	9,37
0	1,68179	0	8,2
0	0	-1,68179	9,1
0	0	1,68179	12,9
0	0	0	9,1
0	0	0	9,1

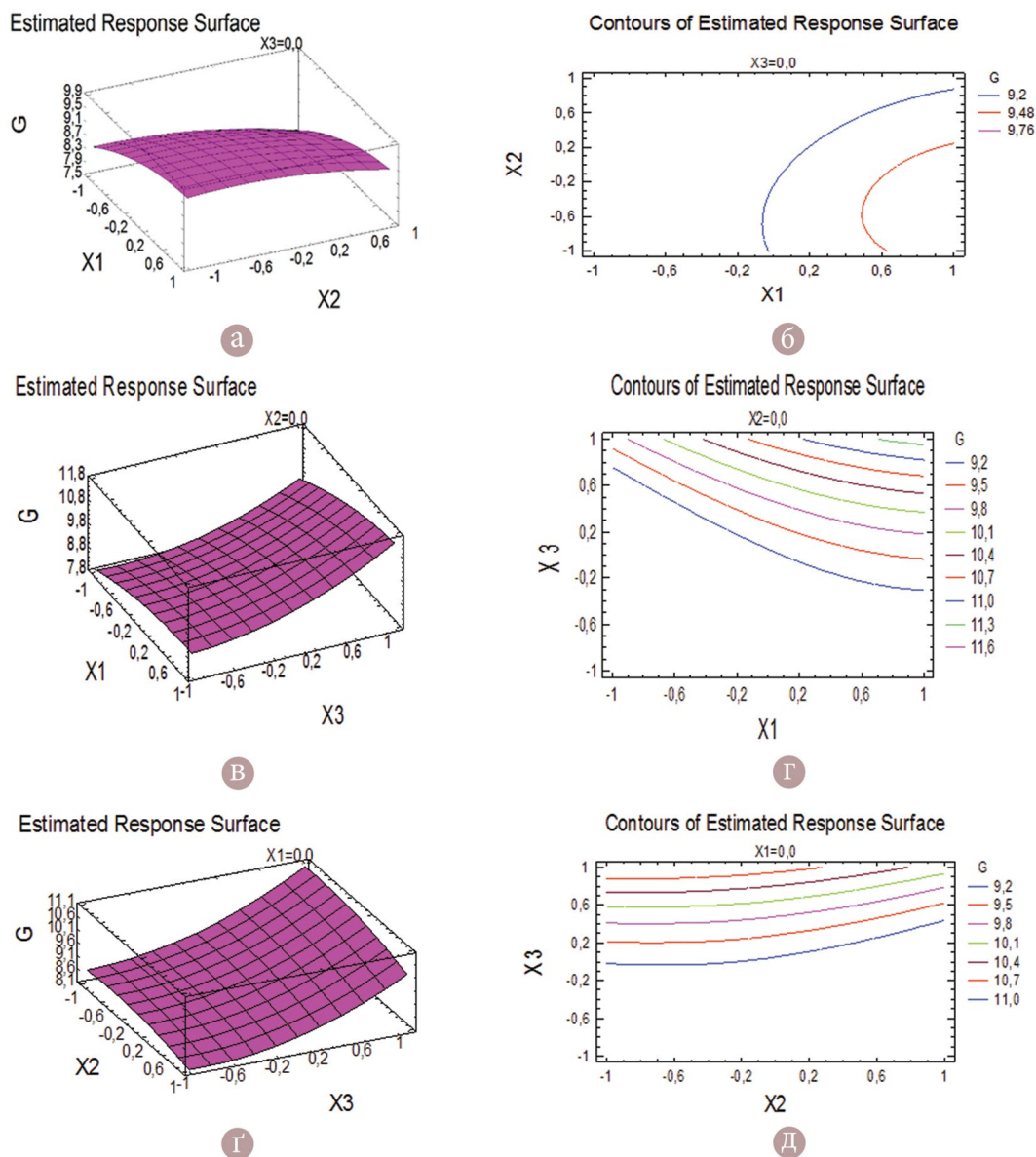


Рис. 2. Тривимірні перетини та контурні криві цільової функції $G(X_1, X_2, X_3)$

а) тривимірна поверхня міцності G для факторів X_1, X_2 при $X_3 = 0$; б) тривимірна поверхня міцності G для факторів X_1, X_2 при $X_3 = 0$; в) тривимірна поверхня міцності G для факторів X_1, X_3 при $X_2 = 0$; г) контурні криві цільової функції G для факторів X_1, X_3 при $X_2 = 0$; д) контурні криві цільової функції G для факторів X_2, X_3 при $X_1 = 0$

Аналіз гіперповерхні $G(X_1, X_3)$ показує ті ж тенденції – по-перше, міцність G прямо пропорційно збільшується залежно від фактора X_1 , по-друге, і на цій гіперповерхні чітко простежується експоненціальна залежність $G(X_3)$.

Важливо наголосити, що результатом моделювання є визначення точки оптимуму при конкретних значеннях $X_1 = 0,689$; $X_2 = -0,295$; $X_3 = 1,105$, міцність за таких рівнів відповідно становитиме 13,582 МПа.

Висновки. 1. Одержано статистичну математичну модель цементно-зольного тампонажного каменю дводобового тужавіння за міцністю. Тампонажний матеріал одержують на основі тампонажного портландцементу ПЦІ-500-Н і модифікатора-наповнювача – золи-виносу ТЕЦ залежно від складу цементного розчину й умов тужавіння.

2. З отриманих гіперповерхонь і контурних кривих визначено характер та ступінь впливу кожного з членів полінома на цільову функцію – міцність цементного каменю

$G(X_1, X_2, X_3)$. На підставі апріорних даних варіативними вибрано три основні фактори: співвідношення вмісту портландцементу до вмісту кислої золи-виносу (X_1), водосумішове відношення (X_2), умови тужавіння тампонажного розчину (температура за відповідних їй пластових тисків у свердловині) (X_3). За значущістю члени моделі-полінома розміщуються в такому порядку: $X_3, X_1, X_3^2, X_2, X_1^2$.

3. Встановлено, що гіперповерхня $G(X_1, X_2)$ має точку екстремуму. Це дає змогу оптимізувати за факторами X_1, X_2 склад тампонажної суміші. Одержаний результат досліджень має наукову новизну. Максимальна міцність тампонажного каменю $G = 13,582$ МПа характерна для точки оптимуму з координатами: $X_1 = 0,689$; $X_2 = -0,295$; $X_3 = 1,105$.

4. Отримана математична модель – адекватна й повністю підтверджується фізико-хімічними процесами, що відбуваються під час тужавіння тампонажного розчину.

5. Практична значущість роботи полягає в тому, що отримані результати дають можливість прогнозувати міцнісні характеристики каменю на основі цементно-зольного складу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Балицкая З. А. Тампонажные растворы для глубоких скважин/З. А. Балицкая, И. Г. Верещака, В. В. Сачков и др. – Москва: Недра, 1976. – 120 с.
2. Богомолов Б. Н. Переход на двухкомпонентную сырьевую смесь с использованием золи ГРЕС/Б. Н. Богомолов, В. И. Батраков//Цемент. – 1990. – № 4. – С. 9–11.
3. Боженев П. И. Технология автоклавных материалов/П. И. Боженев. – Л.: Стройиздат, 1978. – 367 с.
4. Бетоны и изделия из шлаковых и зольных материалов/А. В. Волженский, Ю. С. Буров, Б. Н. Виноградов и др. – М.: Стройиздат, 1969. – 392 с.
5. Булатов А. И. Тампонажные материалы/А. И. Булатов, В. С. Данюшевский. – Москва: Недра, 1987. – С. 164–167.
6. Высоцкий С. А. Золосодержащие цементы и бетоны на их основе/С. А. Высоцкий//Цемент. – 1989. – № 5. – С. 13–14.
7. Горський В. Ф. Матеріали та розчини для цементування свердловин/В. Ф. Горський. – Чернівці, 2006. – 524 с.
8. Горський В. Ф. Сучасний стан та перспективи розвитку виробництва тампонажних матеріалів в Україні/В. Ф. Горський, П. В. Гор-

ський, Ю. Ф. Шевчук та ін.//Нафтогазова промисловість. – 2000. – № 5. – С. 19–20.

9. Данюшевский В. С. Проектирование оптимальных составов тампонажных цементов/В. С. Данюшевский. – М.: Недра, 1978. – 293 с.

10. Дмитриев П. Н. Подготовка к обжигу сырьевого компонента из золы отвалов ТЕЦ/П. Н. Дмитриев, Л. С. Фрайман, К. А. Вязливец//Цемент. – 1989. – № 12. – С. 7–8.

11. Дмитриев А. И. Проблемы использования техногенных материалов при производстве цемента/А. И. Дмитриев, В. Е. Каушанский//Цемент. – 1988. – № 9. – С. 2–3.

12. Иванов И. А. Легкие бетоны на основе зол электростанций/И. А. Иванов. – М.: Изд. лит. по строительству, 1972. – 128 с.

13. Караханиди С. Г. Зола-унос ТЕЦ – активная минеральная добавка/С. Г. Караханиди//Цемент. – 1987. – № 5. – С. 18–19.

14. Макеев Ю. А. Применение отходов горючих сланцев при производстве цемента/Ю. А. Макеев, К. А. Вязливец//Цемент. – 1989. – № 12. – 5 с.

15. Орловський В. М. Сучасні тампонажні матеріали/В. М. Орловський, А. М. Похилко, В. В. Крицький//Геотехнології. – 2018. – № 1. – С. 44–52.

16. Орловський В. М. Тампонажні матеріали, що розширюються при твердінні/В. М. Орловський. – Полтава, 2015. – 129 с.

17. Применение топливных зол отходов ТЭС КАТЕКА в производстве вяжущих/А. В. Киселев, Е. И. Аллилуева, Т. Я. Гальперина и др.//Цемент. – 1988. – № 11. – С. 21–22.

REFERENCES

1. Balickaya Z. A. Cement solutions for deep wells/Z. A. Balickaya, I. G. Vereshhaka, V. V. Sachkov et al. – Moskva: Nedra, 1976. – 120 p. (In Russian).

2. Bogomolov B. N. Transition to a two-component raw material mixture using GRES ash/B. N. Bogomolov, V. I. Batrakov//Cement. – 1990. – № 4. – P. 9–11. (In Russian).

3. Bozhenov P. I. Autoclave materials technology/P. I. Bozhenov. – Leningrad: Strojizdat, 1978. – 367 p. (In Russian).

4. Concrete and products from slag and ash materials/A. V. Volzhenskij, Yu. S. Burov, B. N. Vinogradov et al. – Moskva: Strojizdat, 1969. – 392 p. (In Russian).

5. Bulatov A. I. Cement borehole materials/A. I. Bulatov, V. S. Danyushevskij. – Moskva: Nedra, 1987. – P. 164–167. (In Russian).

6. Vysockij S. A. Ash-bearing cements and concretes on their basis/S. A. Vysockij//Cement. – 1989. – № 5. – P. 13–14. (In Russian).

7. Horskyi V. F. Cement well materials and solutions/V. F. Horskyi. – Chernivtsi, 2006 – 524 p. (In Ukrainian).

8. Horskyi V. F. Current state and prospects of development of production of cement well materials in Ukraine/V. F. Horskyi, P. V. Gorskyi, Yu. F. Shevchuk et al.//Naftohazova promyslovist. – 2000. – № 5. – P. 19–20. (In Ukrainian).

9. Danyushevskij V. S. Designing Optimal Borehole Cement Formulations/V. S. Danyushevskij. – Moskva: Nedra, 1978. – 293 p. (In Russian).

10. Dmitriev P. N. Preparation for firing of the raw material component from the ash of CHP dumps/P. N. Dmitriev, L. S. Fraiman, K. A. Vezhlyvec//Cement. – 1989. – № 12. – P. 7–8. (In Russian).

11. Dmitriev A. I. Problems of using technogenic materials in the production of cement/A. I. Dmitriev, V. E. Kaushanskij//Cement. – 1988. – № 9. – P. 2–3. (In Russian).

12. Ivanov I. A. Light concrete based on power plant ash/I. A. Ivanov. – Moskva: Izd. lit. po stroitelstvu, 1972. – 128 p. (In Russian).

13. Karahanidi S. G. Fly ash TEC – active mineral additive/S. G. Karahanidi//Cement. – 1987. – № 5. – P. 18–19. (In Russian).

14. Makeev Yu. A. Application of wastes of combustible shales in cement production/Yu. A. Makeev, K. A. Vyazhlyvec//Cement. – 1989. – № 12. – 5 p. (In Russian).

15. Orlovskiy V. M. Modern cement well materials/V. M. Orlovskiy, A. M. Pokhylko, V. V. Krytskiy//Heotekhnolohii. – 2018. – № 1. – P. 44–52. (In Ukrainian).

16. Orlovskiy V. M. Borehole cement materials that expand during hardening/V. M. Orlovskiy. – Poltava, 2015. – 129 p. (In Ukrainian).

17. The use of fuel ash waste TES KATEKA in the production of binders/A. V. Kiselev, E. I. Alliluyeva, T. Ja. Galperina et al.//Cement. – 1988. – № 11. – P. 21–22. (In Russian).

Рукопис отримано 8.12.2021.