



УДК 622.245.42

## РОЗРОБКА ТЕРМОСТІЙКОГО ТАМПОНАЖНОГО МАТЕРІАЛУ

**В. М. Орловський<sup>1</sup>, Є. О. Суліма<sup>2</sup>, К. М. Палєєва<sup>3</sup>, А. В. Мележик<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>канд. техн. наук, доцент, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, e-mail: [svaroh13@ukr.net](mailto:svaroh13@ukr.net), ORCID-0000 0002 8749 5354

<sup>2</sup>провідний інженер, Український науково-дослідний інститут природних газів - УкрНДІгаз, e-mail: [jane\\_13@mail.ua](mailto:jane_13@mail.ua),

<sup>3</sup>асистент, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, e-mail: [kat.81p@gmail.com](mailto:kat.81p@gmail.com),

<sup>4</sup>здобувач вищої освіти, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, e-mail: [lina.melehik@gmail.com](mailto:lina.melehik@gmail.com)

## DEVELOPMENT OF HEAT-RESISTANT CEMENT MATERIAL FOR WELLS

**V. M. Orlovskyy<sup>1</sup>, Ye. O. Sulima<sup>2</sup>, K. M. Paleeva<sup>3</sup>, A. V. Melezhih<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>PhD, associate professor, Kharkiv National University of Municipal Economy named after A. M. Beketov, Kharkiv, Ukraine, e-mail: [svaroh13@ukr.net](mailto:svaroh13@ukr.net), ORCID-0000 0002 8749 5354

<sup>2</sup>Leading Engineer, Ukrainian Research Institute of Natural Gases - UkrNDIgaz, e-mail: [jane\\_13@mail.ua](mailto:jane_13@mail.ua),

<sup>3</sup>assistant, Kharkiv National University of Municipal Economy named after A. M. Beketov, Kharkiv, Ukraine, e-mail: [kat.81p@gmail.com](mailto:kat.81p@gmail.com),

<sup>4</sup>a graduate, Kharkiv National University of Municipal Economy named after A. M. Beketov, Kharkiv, Ukraine, e-mail: [lina.melehik@gmail.com](mailto:lina.melehik@gmail.com),

### ABSTRACT

**Objective.** The aim is to develop heat-resistant autoclave hardening cement with high performance properties for cementing high-temperature wells in difficult mining and geological conditions at oil and gas fields and exploration areas of Ukraine.

**Methodology.** During the research, theoretical and experimental methods were used. The experiments were carried out on laboratory equipment simulating reservoir conditions. Measurement of the technological properties of the cement slurry and the formed stone was carried out using standard laboratory equipment. In particular, the density of cement slurries was determined using a pycnometer, the water-mixture ratio of the solutions was selected using a KR-1 flow cone, the water separation of the solutions was determined according to the standard method according to DSTU BV.2.7-86-99, the thickening time of the solutions was determined using a KTs-3 consistometer. a laboratory press PSU-10 with a hydraulic drive and a special attachment were used, the determination of the boundaries of the strength of the stone in bending was carried out according to DSTU BV.2.7-86-99 on a device for testing beams for tensile bending in bending, in compression - on a press PSU-10. The number of experiments performed is sufficient to obtain results with a confidence level of 0.95.

**Results.** Heat-resistant cement of autoclave hardening on the basis of high-calcium and acid ash removal of thermal power plants was created and investigated. A statistical mathematical model of the strength of heat-resistant stone based on mixtures of high-calcium ash and acid ash depending on the content of components in the mixture and hardening conditions was obtained. The obtained mathematical model can be used for engineering estimates of the influence of factors on the strength of cement stone and is fully confirmed by physicochemical processes occurring during hardening of the cement mortar.

**Scientific novelty.** The scientific value of this work lies in the selection of optimal formulations of new heat-resistant cement materials intended for use in difficult mining and geological conditions.

**Practical significance.** The results of the work have practical application in the cementing of deep wells in oil and gas fields and exploration areas in difficult mining and geological conditions of the oil and gas provinces of Ukraine.

**Key words:** well cementing, heat-resistant cement for wells, heat resistance of cement stone, strength of cement stone, adhesion.

## 1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

При цементуванні нафтових і газових свердловин в якості основи більшості тампонажних матеріалів застосовується портландцемент – високоактивний в'язучий матеріал, розчин з якого швидко твердіє при невисоких температурах. Але в гідротермальних умовах глибоких свердловин його застосування не лише економічно невиправдане, але й створює принципово невирішені проблеми щодо довговічності утвореного каменю. Підвищена активність портландцементу при тужавінні у глибоких свердловинах виявляється не лише зайвою, але й шкідливою. Вона є причиною швидкого схоплення цементного розчину і температурної нестабільності утвореного каменю. Якщо сповільнення схоплення регулюється порівняно просто, то питання температурної стійкості значно складніше, так як в жорстких гідротермальних умовах відбувається зниження міцності твердого тіла навіть з так званих термостійких цементів. Це пов'язано з тим, що при невисоких температурах термодинамічна нестабільність мінералів цементного каменю не викликає його структурної нестійкості, так як процес перекристалізації відбувається дуже повільно. Більш того, один з проявів термодинамічної нестійкості – висока питома поверхня гідратних новоутворень є однією з умов забезпечення міцності [1].

Але при високих температурах і тисках, характерних для глибоких свердловин, процеси перекристалізації з утворенням кристалохімічно упорядкованих структур протікають дуже швидко, що призводить до зниження міцності і підвищення проникності цементного каменю.

З огляду на вище сказане актуальною є задача розробки термостійких тампонажних матеріалів з високими технологічними властивостями на основі низькоактивних композицій з метою підвищення якості розмежування гірських порід і нафтогазоносних горизонтів у глибоких нафтових і газових свердловинах.

## 2. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

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

Проведені дослідження [1 – 3] показали, що при застосуванні портландцементів у геотермальних умовах глибоких свердловин виникають проблеми довговічності тампонажного каменю. Висока активність портландцементу є причиною температурної нестабільності тампонажного каменю, що викликає деструктивні процеси, зокрема утворення високоосновного гідросилікату  $C_2SH(A)$ , внаслідок чого поступово знижується міцність і підвищується проникність, навіть у

термостійких цементів. Це приводить до формування шляхів газонафтоводопроводів (ГНВП) і перетоків у свердловині.

Дослідник Гамзатов С.І. вважає[4], що гранична термостійкість тампонажних портландцементів для помірних температур становить 363 – 368 К.

Автори [5, 6] показують, що тампонажний портландцемент може застосовуватись до температури близько 358 К, тобто до глибин 2500 – 3000 м.

За даними [2], навіть при температурі 348 К на пізніх стадіях тужавіння тампонажного портландцементу (через 28 діб) міцність утвореного каменю починає знижуватись.

Досліджуючи процеси тужавіння і деструкції цементного каменю при тривалій гідротермальній дії Данюшевський В. С. зробив висновок про важливе значення генези тієї чи іншої структуротвірної фази для властивостей тампонажного каменю, зокрема його термостійкості [1]. При цьому виділяються два можливих напрямки в одержанні стійких новоутворень на ранніх стадіях тужавіння.

Перший з цих напрямків полягає у виборі в'язучого з найменшою але достатньою для забезпечення необхідної швидкості тужавіння хімічною активністю. Другий напрямок передбачає утворення в реакції із спеціально введеними кремнеземом і глиноземом довговічних в умовах високих температур і тисків гідросилікатів і гідрогранатів кальцію.

Практичне вирішення даного питання пов'язано з розробкою тампонажних композицій, до складу яких входять малоактивні в'язучі матеріали та різні домішки до них, які присутні у відходах металургійної, гірничорудної і хімічної промисловості. Це шлаки, шлами, розплави, золи, горілі породи тощо [7].

Уперше термостійкий тампонажний цемент одержали шляхом додавання до тампонажного портландцементу тонкомеленого кварцового піску [1]. Такі суміші одержали широке застосування завдяки універсальності домішки піску, який добре поєднується з різними типами цементів і практично не впливає на технологічні властивості цементного розчину.

Відомий широкий спектр малоактивних кальцієвмісних компонентів, які присутні у відходах металургійної, енергетичної, гірничорудної і хімічної промисловості (шлаки, шлами, огарки, золи, пил, горілі породи тощо). Цементи з таких матеріалів найбільш економічні та термостійкі [7, 8]. Для тампонажних робіт найширше застосування серед техногенних матеріалів дістали доменні шлаки. Їх хімічний склад близький до складу портландцементного клінкера і відрізняється, як правило, меншим вмістом оксиду кальцію. За ДСТУ Б В.2.7-261:2011, доменні шлаки, залежно від коефіцієнта якості і хімічного складу, поділяють на три сорти. Коефіцієнт якості враховується при оцінюванні їх гідравлічних властивостей. У роботах [9 – 11] показано, що при підвищенні температури процеси гідролізу та гідратації доменних шлаків значно інтенсифікуються і вони стають достатньо активними в'язу-

чими матеріалами. Враховуючи ці якості, на основі доменних шлаків розроблено шлакові та піщано-шлакові цементу для високо температурних (до 473 К) свердловин [3, 10, 12].

Фізико-механічні властивості цементних розчинів на основі доменних шлаків залежать від хіміко-мінералогічного складу вихідного шлаку і способу його охолодження. Для температурних умов 373 – 473 К використовують шлаки з коефіцієнтом якості, не меншим ніж 1,65, для температур 473 – 573 К, не меншим ніж 1,45. При температурах, нижчих за 373 К, для активації шлаків добавляють тампонажний портландцемент [13, 14]. Недоліком тампонажних розчинів на основі доменних шлаків, який обмежує їх використання, є велика густина (1 800 – 2 000 кг/м<sup>3</sup>) внаслідок чого зменшується висота підйому тампонажного розчину в глибоких свердловинах на один ступінь.

Для низьких, нормальних і помірних температур використовують тампонажний шлакопортландцемент з домішкою електро-термофосфорного шлаку [15].

Відомі тампонажні композиції для цементування свердловин у температурному інтервалі 393 – 473 К, у процесі тужавіння яких мають місце фізико-хімічні процеси взаємодії в системах  $CaO-SiO_2-H_2O$ ;  $\beta = C_2S - CaO - H_2O$  [2]. До цієї групи належать вапняно-піщані, нефеліново-піщані (біліто-кремнеземисті) в'язучі матеріали та ін. [1, 2, 3].

Широко застосовують цементно-золу тампонажні суміші, в яких для підвищення термостійкості використано пуцоланову домішку – кислу золу-винос ТЕС [16 – 19]. Доведено можливість використання таких композицій у температурному діапазоні 323 – 473 К [20].

Отже, аналіз досліджень багатьох авторів дає підстави стверджувати, що запобігання ГНВП, унаслідок деструктивних процесів у цементному камені, можна досягти підвищенням термостійкості тампонажних матеріалів у глибоких свердловинах шляхом застосування малоактивних тампонажних композицій на основі широкого спектру мінеральних відходів промислового комплексу.

В Україні для цементування глибоких нафтових і газових свердловин в умовах підвищених і високих температур використовуються спеціальні цементу ШПЦС-120 і ШПЦС-200 та УШЦ-120 і УШЦ-200 виробництва Костянтинівського ВАТ «Обважнювач». Недоліками таких цементів є велика густина та низька якість тампонажного матеріалу, що проявляється в нестабільності приготовленого з нього тампонажного розчину.

### 3. ПОСТАНОВКА МЕТИ

Мета досліджень полягає в розробленні термостійкого тампонажного матеріалу автоклавного

тужавіння з високими експлуатаційними властивостями для цементування високотемпературних свердловин в складних гірничо-геологічних умовах на нафтових і газових родовищах та геологорозвідувальних площах України.

### 4. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ І РЕЗУЛЬТАТИ

При визначенні оптимального складу тампонажних матеріалів (оптимального спів відношення компонентів золуних сумішей) основними критеріями можуть бути гранична міцність тампонажного каменю, міцність контакту каменю з обмежувальною поверхнею, газопроникність, величина лінійного розширення і корозійна стійкість.

Для обґрунтування оптимального використання пиловидних зол ТЕС як в'язучих матеріалів і домішок до них звернемо до їх класифікації. На сьогодні існує декілька класифікацій шлаків та зол за походженням, хімічним і мінералогічним складом тощо, але жодна з них не дістала широкого практичного застосування. Найчастіше використовувалася класифікація за модулем

основності ( $M_{осн}$ ) й активності ( $M_{акт}$ ), покладена в основу ДСТУ Б В.2.7-261:2011 на доменні гранульовані шлаки для виробництва цементу. Але дослідження і досвід промисловості показали відсутність закономірності між величиною цих модулів і властивостями матеріалу [21]. Очевидно, це пов'язане з тим, що вони є виключно емпіричними коефіцієнтами, які одержані на основі статистичних даних у процесі дослідження конкретної групи матеріалів.

У нашій роботі зроблено спробу використати в процесі підбору оптимального кількісного складу золуних сумішей коефіцієнт основності  $K_{осн}$  (3.1), запропонований Боженівим П. І., який враховує не лише співвідношення, але і деякою мірою динаміку реакції між найголовнішими оксидами в процесі тужавіння [22]. Перший член чисельника ( $CaO + 0,93MgO + 0,6R_2O$ )

показує загальний (валовий) вміст (у відсотках) «умовного»  $CaO$ , і чим його більше, тим активнішим є цей матеріал. Другий член чисельника ( $0,55Al_2O_3 + 0,35Fe_2O_3 + 0,7SO_3 + 1,3CO_2$ )

визначає кількість  $CaO$ , яка зв'язується відповідними оксидами і не бере участі в утворенні силікатів. У цілому чисельник показує, скільки відсотків «умовного»  $CaO$  залишається вільним для утворення силікатів кальцію.

Знаменник  $0,93SiO_2$  показує, скільки потрібно  $CaO$  (у відсотках) для зв'язування  $SiO_2$  у моносилікат кальцію, і чим більший знаменник, тим більше в суміші може бути силікатів кальцію, а їх основність можна визначити за  $K_{осн}$ .

$$K_{осн} = \frac{(CaO + 0,93MgO + 0,6R_2O) - (0,55Al_2O_3 + 0,35Fe_2O_3 + 0,7SO_3 + 1,3CO_2)}{0,93SiO_2} \quad (3.1)$$

Відомо, що низькоосновні гідросилікати кальцію і магнію надають цементному каменю високу міцність, термо- і корозійну стійкість у баротермальних умовах глибоких свердловин. Тому необхідно добиватись їх кількісної переваги у складі цементуючої зв'язки.  $K_{осн}$  золи висококальцієвої, яка утворюється при спалюванні горючих сланців на електростанціях, становить 0,823 та, за класифікацією Боженова П. І., цей матеріал відносять до нейтральної сировинної групи (матеріали автоклавного тужавіння) [21].

Згідно з дослідженнями [1], найбільша міцність і термостійкість каменю при тривалій гідротермальній обробці в чисто силікатній системі досягається при мольному відношенні  $CaO / SiO_2 \leq 0,8$  для температур 333 – 363 К і  $CaO / SiO_2 \leq 0,6$  для температур 363 – 393 К. Це в переважній більшості випадків відповідає  $K_{осн} - 0,3 \div 0,7$  [21]. Розраховані значення  $K_{осн}$  для різних складів зольних сумішей показано в

таблиці 3.1. Аналізуючи одержані дані, можна передбачити, що найбільша міцність золотого каменю буде відповідати складам, які включають 20 – 50 мас. % домішки кислої золи. Для перевірки цього припущення зразки золотих сумішей різного складу піддавались автоклавуванню протягом двох діб при температурі 348 К і тиску 30 МПа (табл. 3.1). Випробування однієї з важливих характеристик золотого каменю – границі міцності при стисненні – показали близькі до теоретичних передбачень результати вибору оптимального кількісного складу тампонажних композицій на основі розрахованого коефіцієнта основності. Найкращі показники міцності мають зразки, у складі яких міститься 30 – 50 мас. % кислої золи. Враховуючи, крім міцності, й інші характеристики золотого каменю (силу зчеплення з металом (адгезію), газопроникність, відносне лінійне розширення, корозійну стійкість при вилуговуванні), оптимальний кількісний склад золотих композицій дещо змінюється і відповідає складам, які включають 30 – 70 мас. % кислої золи.

**Таблиця 3.1** – Визначення оптимального складу золотих сумішей, що розширюються при твердінні

Тампонажний матеріал, мас. часток %		В/С	Коефіцієнт основності	Відносне лінійне розширення каменю, %	Границя міцності каменю при стисненні, МН/м <sup>2</sup>	Міцність зчеплення каменю з металом, МН/м <sup>2</sup>	Газопроникність каменю, мкм <sup>2</sup> ·10 <sup>-3</sup>	Коефіцієнт стійкості при вилуговуванні через 360 діб
ЗВ	ЗК							
100	–	0,55	0,823	3,33	0,40	2,20	6,30	0,80
90	10	0,55	0,716	3,29	0,70	2,40	3,93	0,813
80	20	0,55	0,609	3,26	2,50	2,90	2,10	0,84
70	30	0,55	0,504	3,21	13,90	3,70	0,98	0,96
60	40	0,55	0,396	3,18	13,00	4,43	0,595	0,97
50	50	0,55	0,289	3,00	11,00	4,75	0,58	0,97
40	60	0,55	0,182	1,84	8,80	4,45	0,76	0,97
30	70	0,55	0,074	0,68	6,00	3,00	1,54	0,97
20	80	0,55	–0,031	0,045	0,90	0,43	3,50	0,85
10	90	0,55	–0,138	0,02	0,26	0,11	6,70	0,83
–	100	0,55	–0,245	–	–	–	–	–

\*Умови тужавіння: температура 348 К, тиск 30 МПа, час 2 доби

У процесі проведення лабораторних досліджень були вивчені технологічні властивості оптимальних складів золотих сумішей. Золоті розчини мають густину 1 500 – 1 790 кг/м<sup>3</sup>, водовідді-

лення золотих сумішей 6,0 – 15,0 мл, максимальна величина розширення каменю на основі золотих сумішей – 3,21 %. Камінь із золотих сумішей має високі показники міцності і міцності зчеплення з

металом обсадних труб, низьку газопроникність ( $0,98 - 1,54 \text{ мкм}^2 \cdot 10^{-3}$ ), високу корозійну стійкість при знелуженні та в умовах дії більш жорсткої магнезійної агресії. Час прокачування золоних сумішей легко регулюється за допомогою відомих хімічних реагентів, наприклад, нітрилотриметилфосфонової кислоти (НТФК).

Одним з основних завдань даного дослідження є одержання статистичної моделі міцності золоного тампонажного каменю. Особливий інтерес викликає питання характеру можливого негативного впливу на міцність тампонажного каменю певного співвідношення золоних компонентів – золи висококальцієвої і золи кислої та оцінювання кількісних характеристик цього впливу.

Для розробки статистичної моделі застосо-

ваний ротатабельний центральнокпозиційний план експерименту, що забезпечує однакову похибку по всьому факторному простору. Функція відгуку – міцність утвореного цементного каменю на стиснення через дві доби від початку тужавіння тампонажного розчину ( $G$ , МПа). На підставі апріорних даних варіативними вибрані три основні фактори: вміст золи висококальцієвої ( $X_1$ ), водосумішеве відношення ( $X_2$ ), умови тужавіння тампонажного розчину (температура при відповідних їй пластових тисках у свердловині) ( $X_3$ ). Вибрані фактори відповідають вимогам керованості, взаємонезалежності, однозначності, яким повинні задовольняти вхідні фактори при плануванні експерименту. Область факторного простору представлена в таблиці 4.1.

**Таблиця 4.1** – Область факторного планування

Фактор	Код фактора	Одиниця виміру	Рівні факторів				
			-1,68179	-1	0	1	1,68179
Зола висококальцієва (ЗВ)	$X_1$	%	30	40	50	60	70
Водосумішеве відношення (В/С)	$X_2$	%	0,53	0,54	0,55	0,56	0,57
Температура (t)	$X_3$	°C (K)	50 (323)	75(348)	100 (373)	125 (398)	150 (423)

За допомогою комп'ютерної програми STATGRAPHICS Plus for Windows отримана план-матриця експерименту, реалізована в лабораторних умовах (табл. 4.2).

**Таблиця 4.2** – Матриця планування експерименту та експериментальні дані

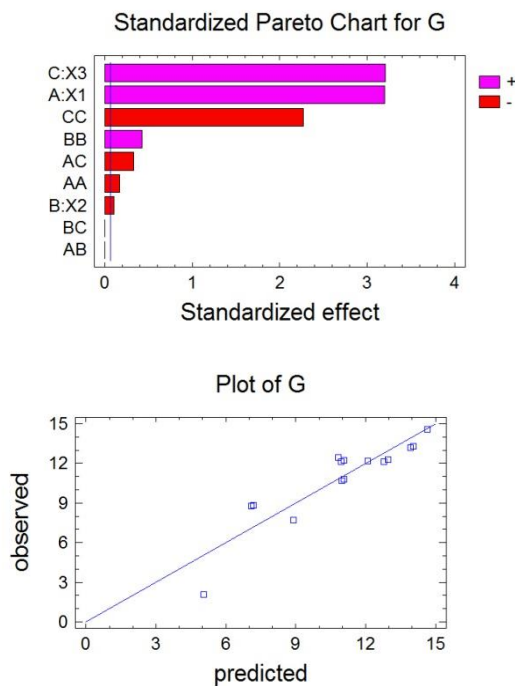
$X_1$	$X_2$	$X_3$	$G$ , Мпа
-1	-1	-1	8,85
1	-1	-1	12,25
-1	1	-1	8,75
1	1	-1	12,15
-1	-1	1	10,80
1	-1	1	13,30
-1	1	1	10,70
1	1	1	13,20
-1,68179	0	0	7,70
1,68179	0	0	14,55
0	-1,68179	0	12,30
0	1,68179	0	12,10
0	0	-1,68179	2,10
0	0	1,68179	12,45
0	0	0	12,20
0	0	0	12,20

Обробка результатів лабораторних досліджень проведена з використанням комп'ютерної системи STATGRAPHICS Plus for Windows. На рисунку 4.1 представлено паретто-графік і графік порівняння

розрахункових та експериментальних даних. Коефіцієнт детермінації  $R^2 = 82,4935\%$ , показник узгодженості функції Lack-of-fit

$P = 0,079$ , а стандартна помилка оцінки  $SE = 1,97292$ , що свідчить про можливість використання регресійної моделі для інженерних оцінок впливу факторів.

На рисунку 4.1, б показано взаємозв'язок одержаних і розрахункових даних. Основна частина експериментальних точок знаходиться в околиці прямої, що ще раз побічно підтверджує висновок про коректність моделі.



a)

б)

**Рисунок. 4.1** – Статистичні оцінки регресійної моделі:

*a* – парето-графік (вертикальна лінія відповідає 95 % значущості коефіцієнтів); *б* – графік порівняння експериментальних (observed) і розрахункових (predicted) значень цільової функції.

З парето-графіка (рис. 4.1, *a*) видно, що при 95 % довірчої ймовірності, статистичну значущість мають коефіцієнти моделі  $X_3$  і  $X_1$ , при цьому коефіцієнт  $X_2$  є статично найменш незначущим. Тобто, аналітично підтверджується, що

водосумішеве відношення суттєво не впливає на міцність тампонажного каменю в заданому діапазоні В/С.

У загальному вигляді отримано наступне рівняння регресії:

$$G = 12,087 + 1,70759 \cdot X_1 - 0,0539186 \cdot X_2 + 1,71391 \cdot X_3 - 0,107216 \cdot X_1^2 + 0,0 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,225 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,272855 \cdot X_2^2 + 0,0 \cdot X_2 \cdot X_3 - 1,4684 \cdot X_3^2 \quad (4.1)$$

З урахуванням значущості коефіцієнтів рівняння регресії при 95 % довірчої ймовірності рівняння (4.1) набуває вигляду:

$$G = 12,087 + 1,70759 \cdot X_1 - 0,0539186 \cdot X_2 + 1,71391 \cdot X_3 - 0,107216 \cdot X_1^2 - 0,225 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,272855 \cdot X_2^2 - 1,4684 \cdot X_3^2 \quad (4.2)$$

На рисунку 4.2 показано тривимірні перетини цільової функції  $G(X_1, X_2, X_3)$  та відповідні контурні криві.

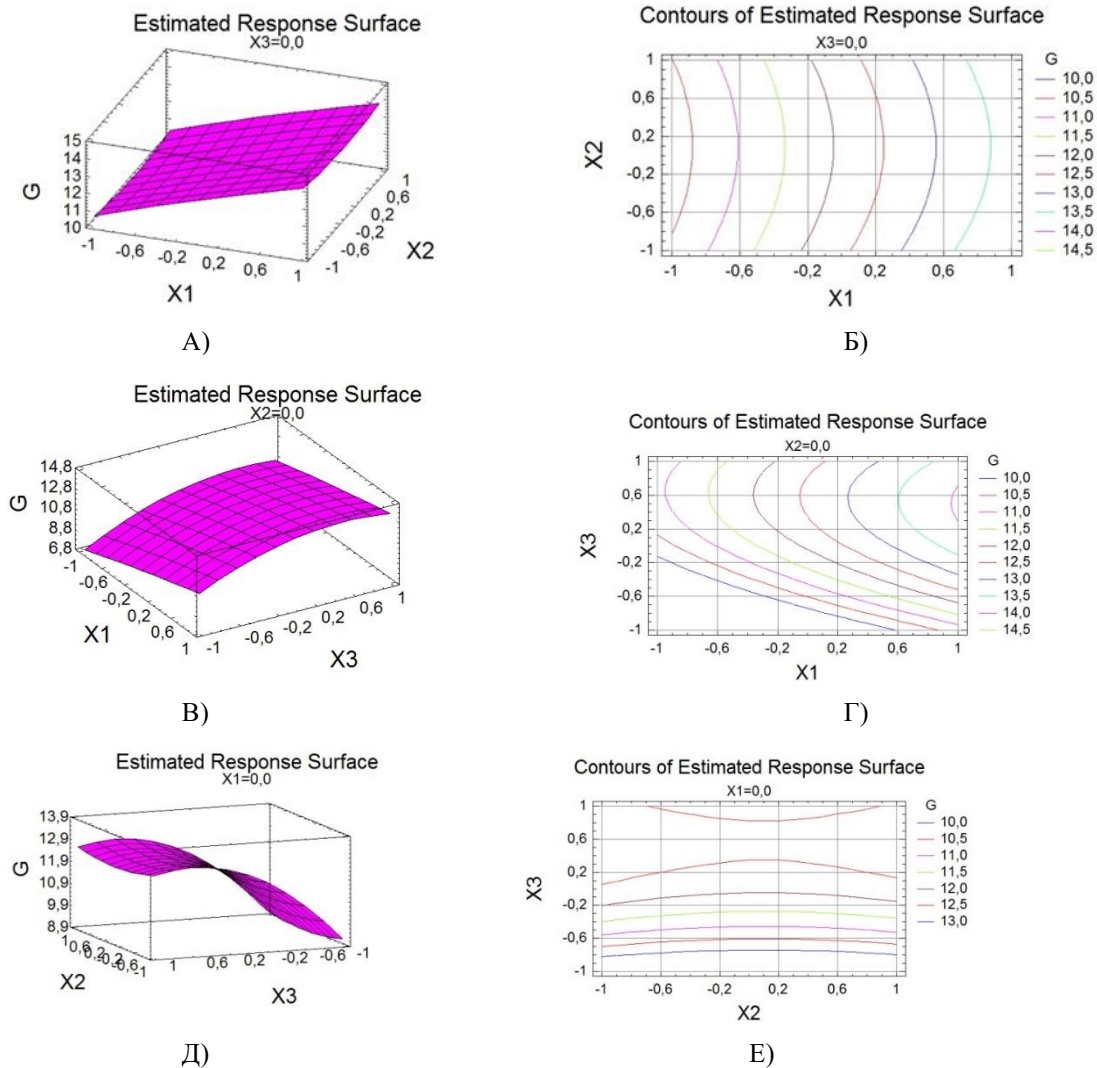
Аналізуючи паретто-графік (рис. 4.1, *a*) та рівняння регресії (4.2) констатуємо, що найбільш значимим для визначення цільової функції  $G(X_1, X_2, X_3)$  є фактори  $X_1$  – вміст в суміші золи висококальцієвої та  $X_3$  – умови тужавіння тампонажного розчину (температура при

відповідних їй пластових тисках у свердловині). За значущістю члени моделі-полінома розміщуються в наступному порядку:  $X_3, X_1, X_3^2$ .

Згідно із одержаними гіперповерхнями і контурними кривими рисунка 4.2, збільшення фактора  $X_3$  – температури призводить до збільшення міцності тампонажного каменю, при чому спочатку спостерігається стрімке зростання цільової функції до певної точки. Отримана залежність з фізичної точки зору пояснюється тим, що при зростанні температури величина

пересичення розчинів гідратних новоутворень

збільшується.



**Рисунок 4.2** – Тривимірні перетини та контурні криві цільової функції  $G(X_1, X_2, X_3)$ :

$a$  – тривимірна поверхня міцності  $G$  для факторів  $X_1, X_2$  при  $X_3=0$ ;  $b$  – контурні криві цільової функції  $G$  для факторів  $X_1, X_2$  при  $X_3=0$ ;  $c$  – тривимірна поверхня міцності  $G$  для факторів  $X_1, X_3$  при  $X_2=0$ ;  $d$  – контурні криві цільової функції  $G$  для факторів  $X_1, X_3$  при  $X_2=0$ ;  $e$  – тривимірна поверхня міцності  $G$  для факторів  $X_2, X_3$  при  $X_1=0$ ;  $f$  – контурні криві цільової функції  $G$  для факторів  $X_2, X_3$  при  $X_1=0$

А критичний радіус зародків твердої фази зменшується. Внаслідок цього, число контактів зрощування мікрочастин зростає, і вони в результаті втрати надлишкової води та інтенсивного обростання новими гідратними утвореннями зміцнюються [8]. Відповідно зростає міцність кристалічної ґратки. Але в рецептурах золових термостійких тампонажних композицій при максимальному вмісті золи висококальцієвої (60 – 70 %) прямо пропорційна залежність міцності від впливу умов тужавіння цементу спостерігається до певного критичного значення температури. Це зумовлено особливістю гідратації золових сумішей. При високих температурах (100 °C і вищих) гідратні новоутворення таких композицій стають термодинамічно нестійкими.

За гіперповерхнями простежується зростання залежності  $G(X_1)$  при практично будь-яких

значеннях фактора  $X_2$ . Це свідчить про значимість фактора вмісту висококальцієвої золи ( $X_1$ ) і відносну незначимість фактора водосумішевого відношення ( $X_2$ ). Це підтверджується Паретто-графіком.

Фізично вплив водосумішевого відношення пояснюється тим, що надлишкова вода при змішуванні не бере участь у гідратації портландцементних зерен і залишається у вигляді вільної води, що і призводить до зниження міцності.

Як бачимо з аналізу гіперповерхні  $G(X_2, X_3)$ , міцність каменю експоненційно залежить від температури (фактор  $X_3$ ). При цьому, як і у випадку гіперповерхні  $G(X_2, X_1)$ , фактор  $X_2$  суттєво не впливає на міцність каменю.

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 експоненційна залежність  $G(X_3)$ .

Контурні криві цільової функції  $G$  для факторів  $X_1, X_2, X_3$  показують, що факторний простір не включає екстремуми поверхонь  $G(X_1, X_3)$ ,  $G(X_2, X_3)$ ,  $G(X_1, X_2)$ . Тільки у випадку  $G(X_1, X_3)$  оптимум простежується в області  $X_1$  більше 1 при  $X_3 \approx 0,6$ . Саме ця область і виділяється як перспективна для подальших досліджень, які будуть продовжені.

## ВИСНОВКИ

Комплекс виконаних нами досліджень дозволив установити, що суміші золи висококальцієвої, яка містить в'язучу основу – вільні оксиди кальцію і золи кислоти, в якій міститься активний кремнезем, можуть бути основою термостійких тампонажних матеріалів для цементування високотемпературних нафтових і газових свердловин.

Досліджено технологічні властивості оптимальних складів золувих сумішей. Камінь із золувих сумішей має високі показники міцності і міцності зчеплення з металом обсадних труб, низьку газопроникність, високу корозійну стійкість при знелуженні.

Одержано статистичну математичну модель міцності термостійкого каменю на основі сумішей золи висококальцієвої і золи кислоти залежно від вмісту компонентів у суміші та умов тужавіння.

З отриманих гіперповерхонь і контурних кривих визначено характер та ступінь впливу кожного з членів полінома на цільову функцію – міцність цементного каменю  $G(X_1, X_2, X_3)$ . Найбільш значимими є фактори  $X_1$  – вміст в суміші золи висококальцієвої та  $X_3$  – умови тужавіння тампонажного розчину (температура при відповідних їй пластових тисках у свердловині). Далі за значимістю члени моделі-полінома розміщуються в наступному порядку:  $X_3, X_1, X_3^2$ .

Отримана математична модель може бути використана для інженерних оцінок впливу факторів на міцність цементного каменю і повністю підтверджується фізико-хімічними процесами, що відбуваються при тужавінні тампонажного розчину.

Наукова цінність даної роботи полягає в тому, що проведено підбір оптимальних рецептур нових тампонажних матеріалів, призначених для застосування в складних гірничо-геологічних умовах.

Результати роботи мають практичне застосування при цементуванні нафтових і газових свердловин в складних гірничо-геологічних умовах (при високих пластових температурах) на геологорозвідувальних площах та промислових родовищах вуглеводневої сировини України.

## REFERENCES / СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Данюшевский В.С. Проектирование оптимальных составов тампонажных цементов / В.С. Данюшевский. – Москва: Недра, 1978. – 293

с.

2. Крепление высокотемпературных скважин в коррозионно-активных средах / [В.М. Кравцов, Ю.С. Кузнецов, М.Р. Мавлютов, Ф.А. и др.]. – Москва: Недра, 1987. – 192 с.

3. Шадрин Л.Н. Регулирование свойств тампонажных растворов при цементировании скважин / Л.Н. Шадрин. – Москва: Недра, 1969. – 240 с.

4. Гамзатов С.И. Применение вяжущих веществ в нефтяных и газовых скважинах / С.И. Гамзатов. – М.: Недра, 1985. – 148 с.

5. Мачинский Е.К. Многокомпонентные смеси для цементирования скважин / Е.К. Мачинский // Бурение скважин и разработка нефтяных месторождений: (сб. научн. трудов ГрозНИИ). – 1960. – № 6. – С. 113 – 121.

6. Бандур Р.В. Проблема подбора рецептура тампонажных розчинів для заданих вибійних умов / Р.В. Бандур, О.В. Лужаниця, С.Г. Михайленко [та ін.] // Питання розвитку газової промисловості України: (зб. наук. робіт УкрНДГаз). – Харків, 2005. – С. 135 – 137.

7. Каримов Н.Х. Вяжущие материалы, изготавливаемые из промышленных отходов, и их применение при креплении скважин / Н.Х. Каримов, Б.Н. Хахаев, В.С. Данюшевский // Бурение: И.О. – Москва: ВНИИОЭНГ. – 1982. – 48 с.

8. Горський В.Ф. Тампонажні матеріали і розчини / В.Ф. Горський. – Чернівці: 2006. – 524 с.

9. Булатов А.И. Цементы для цементирования глубоких скважин / А.И. Булатов. – Москва: Гостехтопиздат, 1962. – 202 с.

10. Булатов А.И. Цементирование глубоких скважин / А.И. Булатов. – Москва: Недра, 1964. – 298 с.

11. Мачинский Е.К. Цементно-песчаные растворы для тампонажа скважин / Е.К. Мачинский, А.И. Булатов. – Грозный: Чечено-Ингушское кн. изд-во, 1960. – 91 с.

12. Мачинский Е.К. Шлакопесчаные безобжиговые цементы для тампонажа скважин с забойными температурами до 200 °С / Е.К. Мачинский, А.И. Булатов, А.И. Стафикуло // Нефтяное хозяйство. – 1958. – № 4. – С. 7 – 9.

13. Мачинский Е.К. Тампонажные свойства шлаковых смесей при температуре 100 – 130 °С / Е.К. Мачинский, И.С. Финогенов // Нефтепромысловое дело. – 1961. – № 2. – С. 13 – 15.

14. Мачинский Е.К. Исследование тампонажных цементов для глубоких скважин с большими забойными температурами и давлениями / Е.К. Мачинский, И.С. Федулова // Нефтепромысловое дело. – 1961. – № 12. – С. 11 – 14.

15. Криулин В.Н. Использование отвального электротермофосфорного шлака / В.Н. Криулин, Т.А. Федулова // Цемент. – 1987. – № 1. – С. 18.

16. Зельцер П.Я. Цементирование скважин цемента-зольными тампонажными растворами /



П.Я. Зельцер, А.М. Бережной, И.С. Илованский // Серия "Бурение": РНТС. – Москва: ВНИИОЭНГ, 1971. – Вып. 6. – С. 10 – 12.

17. Behsted John. Oil Well cements / John Behsted // *Cement and Ind.* – 1983. – № 20. – P. 16 – 17.

18. Nelson Erik B. Portland cements characterized valuted / Erik B. Nelson // *Oil and Gas Journal.* – 1983. – № 6. – P. 81.

19. Михайленко С.Г. Оптимизация процессов цементирования скважин / С.Г. Михайленко, А.С. Серяков, В.Н. Орловский [и др.] // *Техника и технология геологоразведочных работ, организация производства: О.И.* – Москва: ВИЭМС. – 1988. – 26 с.

20. Крых Б.В. Повышение термостойкости тампонажных портландцементов добавками золы-уноса / Б.В. Крых // *Термо- и солеустойчивые промывочные жидкости и тампонажные растворы: тезисы докладов Первой Украинской научно-техн. конференции.* – Киев: Наукова думка, 1970. – Часть 1. – 168 с.

21. Боженев П.И. Технология автоклавных материалов / П.И. Боженев. – Ленинград: Стройиздат, 1978. – 367 с.

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

## ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

**Мета** – розробленні термостійкого тампонажного матеріалу автоклавного тужавіння з високими експлуатаційними властивостями для цементування високотемпературних свердловин в складних гірничо-геологічних умовах на нафтових і газових родовищах та геологорозвідувальних площах України.

**Методика.** При проведенні досліджень використано теоретичні й експериментальні методи. Експерименти проведено на лабораторному обладнанні, яке моделює пластові умови. Вимірювання технологічних властивостей тампонажного розчину та утвореного каменю проводилось з використанням стандартного лабораторного обладнання. Зокрема густина тампонажних розчинів визначалась з допомогою пікнометра, водосумішеве відношення розчинів підбиралось за допомогою конуса розтічності КР-1, водовідділення розчинів визначалось за стандартною методикою згідно ДСТУ БВ.2.7-86-99, час загуснення розчинів визначався на консистометрі КЦ-3, для вивчення адгезії використовувався лабораторний прес ПСУ-10 з гідравлічним приводом і спеціальна приставка, визначення границь міцності каменю при вигині проводилось згідно ДСТУ БВ.2.7-86-99 на приладі для випробування зразків-балочок на розтягування при вигині, при стискуванні – на пресі ПСУ-10. Кількість проведених експериментів достатня для одержання результатів з довірчою вірогідністю 0,95.

**Результати.** Створено і досліджено термостійкий тампонажний матеріал автоклавного тужавіння на основі висококальцієвої і кислої зол-виносу ТЕС. Одержано статистичну математичну модель міцності термостійкого каменю на основі сумішей золи висококальцієвої і золи кислої залежно від вмісту компонентів у суміші та умов тужавіння. Отримана математична модель може бути використана для інженерних оцінок впливу факторів на міцність цементного каменю і повністю підтверджується фізико-хімічними процесами, що відбуваються при тужавінні тампонажного розчину.

**Наукова новизна.** Наукова цінність даної праці полягає в тому, що проведено підбір оптимальних рецептур нових термостійких тампонажних матеріалів, призначених для застосування в складних гірничо-геологічних умовах.

**Практична значимість.** Результати роботи мають практичне застосування при цементуванні глибоких свердловин на нафтових і газових родовищах та геологорозвідувальних площах в складних гірничо-геологічних умовах нафтогазових провінцій України.

**Ключові слова:** цементування свердловин, термостійкий тампонажний цемент, термостійкість цементного каменю, міцність цементного каменю, адгезія.

## ABSTRACT (IN RUSSIAN)

**Цель** – разработка термостойкого тампонажного материала автоклавного схватывания с высокими эксплуатационными свойствами для цементирования высокотемпературных скважин в сложных горно-геологических условиях на нефтяных и газовых месторождениях и геологоразведочных площадях Украины.

**Методика.** При проведении исследований использованы теоретические и экспериментальные методы. Эксперименты проведены на лабораторном оборудовании, моделирующем пластовые условия. Измерение технологических свойств тампонажного раствора и образовавшегося камня производилось с использованием стандартного лабораторного оборудования. В частности, плотность тампонажных растворов определялась с помощью пикнометра, водосмесевое отношение растворов подбиралось с помощью конуса растечности КР-1, водоотделение растворов определялось по стандартной методике согласно ДСТУ БВ.2.7-86-99, время загустения растворов определялось на консистометре КЦ-3. использовался лабораторный пресс ПСУ-10 с гидравлическим приводом и специальная приставка, определение границ прочности камня при изгибе проводилось согласно ДСТУ БВ.2.7-86-99 на приборе для испытания образцов-балочек на растяжение при изгибе, при сжатии – на прессе ПСУ-10. Количество проведенных экспериментов достаточно для получения результатов с доверительной вероятностью 0,95.

**Результаты.** Созданы и исследованы термостойкий тампонажный материал автоклавного схватывания на основе высококальциевой и кислой зол-выноса ТЭС. Получена статистическая математическая модель прочности термостойкого камня на основе смесей высококальциевой и золы кислой золы в зависимости от содержания компонентов в смеси и условий схватывания. Полученная математическая модель может быть использована для инженерных оценок влияния прочностных факторов цементного камня и полностью подтверждается физико-химическими процессами, происходящими при твердении тампонажного раствора.

**Научная новизна.** Научная ценность данной работы состоит в том, что произведен подбор оптимальных рецептур новых термостойких тампонажных материалов, предназначенных для применения в сложных горно-геологических условиях.

**Практическая значимость.** Результаты работы имеют практическое применение в цементировании глубоких скважин на нефтяных и газовых месторождениях и геологоразведочных площадях в сложных горно-геологических условиях нефтегазовых провинций Украины.

**Ключевые слова:** *цементирование скважин, термостойкий тампонажный цемент, термостойкость цементного камня, прочность цементного камня, адгезия.*

## ABOUT AUTHORS

**В. М. Орловський** канд. техн. наук, доцент Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, e-mail: svaroh13@ukr.net

**Є. О. Суліма** провідний інженер Український науково-дослідний інститут природних газів – УкрНДІгаз, e-mail: jane\_13@mail.ua

**К. М. Палєєва** асистент Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, e-mail: kat.81p@gmail.com

**А. В. Мележик** здобувач вищої освіти Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, e-mail: lina.melehik@gmail.com