

7. Исследование влияния формы заряда в донной части шпура на изменение прочностных свойств среды при взрыве / В.В. Воробьев, А.М. Пеев // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва: науково-виробничий збірник. – Кременчук: КДУ, 2009. – Вип. 2/2009(4). – С. 35–39.

8. Бротанек И., Вода Й. Контурное взрывание в горном деле и строительстве. Перев. с чешск. под ред. Б.Н. Кутузова. – М.: Недра, 1983. – 144 с.

9. Покровский Н.М. Технология строительства подземных сооружений и шахт. – М.: Недра, 1977. – 400 с.

10. Смирняков В.В., Вихарев В.И., Очуров В.И. Технология строительства горных предприятий. – М.: Недра, 1989. – 573 с.

11. Лонг Ф., Мохиндра Д., Сикорд Р., Сазерленд Д., Свобода Д. Руководство для программиста на Java: 75 рекомендаций по написанию надежных и защищенных программ. Пер. с англ. – М.: Вильямс, 2014. – 256 с.

12. Хорстман, С., Корнелл Г. Java 2. Библиотека профессионала. Основы. Пер. с англ. под ред. В.В. Вейтмана. – М.: Вильямс, 2007. – 896 с.

Рукопис подано до редакції 11.03.17

УДК 622.245.42

В.М. ОРЛОВСЬКИЙ, канд. техн. наук, доц, А.М. ПОХИЛКО, асистент,
Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка

МОДЕЛЮВАННЯ МІЦНОСТІ ЦЕМЕНТНОГО КАМЕНЮ З ПОЛЕГШЕНОГО ТАМПОНАЖНОГО МАТЕРІАЛУ

Метою даної роботи є одержання статистичної математичної моделі цементного каменю, отриманого з полегшеного тампонажного матеріалу на основі тампонажного портландцементу ПЦТІ-100 з домішкою полегшувальної добавки і використання її для прогнозування міцнісних характеристик утвореного цементного каменю залежно від складу тампонажного розчину та умов його тужавіння. Зокрема, ставиться задача встановлення впливу на міцність тампонажного каменю добавки – спученого перлітового піску.

Методи дослідження. Для одержання статистичної моделі використано ротатабельний центральноконпозиційний план експерименту. Обробку результатів проведено із застосуванням методу комп'ютерного математичного моделювання за допомогою системи STATGRAPHICS Plus for Windows.

Наукова новизна. Встановлено, що гіперповерхня $G(X_1, X_3)$ має точку екстремуму, що дозволяє оптимізувати за факторами X_1, X_3 склад тампонажної суміші.

Практична значимість. Результати, отримані в даній роботі дають можливість прогнозувати міцнісні характеристики каменю з полегшеного і легкого тампонажного матеріалу на основі стандартного тампонажного портландцементу ПЦТІ-100 з домішками спученого перлітового піску.

Результати. Одержана статистична математична модель міцності цементного каменю з полегшеного (легкого) тампонажного матеріалу на основі тампонажного портландцементу ПЦТІ-100 і модифікатора-наповнювача спученого перлітового піску залежно від складу цементного розчину і умов тужавіння. На основі аналізу результатів моделювання показано, що введення полегшувальної добавки до тампонажної суміші в кількості до 11 % на суху масу негативно не впливає на міцність цементного каменю. 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 значимим є фактор X_2 - водосумішеве відношення. Далі за значимістю члени моделі-полінома розміщуються в наступному порядку: X_3, X_3^2 , а при довірчій імовірності 90% цей ряд має вигляд: X_2, X_3, X_3^2, X_1^2 .

Максимальна міцність тампонажного каменю $G=5,98$ МПа має місце в точці оптимуму з координатами: $X_1=0,00589592$; $X_2=-1,68178$; $X_3=1,55811$.

Ключові слова: полегшений тампонажний матеріал, спучений перлітовий пісок, ротатабельний центральноконпозиційний план експерименту, моделювання міцності, Парето-графік, поверхні відгуку, рівняння регресії.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. На території України в кожному нафтогазоносному регіоні зустрічаються пласти з аномально-низькими пластовими тисками, а також пласти, складені карбонатними (тріщинуватими) та іншими породами, що мають високу поглинальну здатність. При кріпленні свердловин в таких гірничо-геологічних умовах постає задача зниження тиску стовпа тампонажного розчину на пласти з метою запобігання поглинань. Вирішення цієї технологічної задачі лежить в площині застосування легких (<1400 кг/м³) і полегшених (1400-1650 кг/м³) тампонажних розчинів [1-4].

Аналіз досліджень і публікацій. Тампонажні цементні з пониженою густиною цементного розчину належать до модифікованих матеріалів. До найбільш поширених способів зниження густини тампонажних розчинів належать [4-6]:

добавка легкого наповнювача або використання в'язучої речовини з меншою густиною;

підвищення водосумішевого відношення з одночасним збільшенням водоутримувальної здатності розчину;

уведення у тампонажний розчин газової фази з одночасним її диспергуванням і стабілізацією утвореної піни;

введенням штучних або природних полих мікрочасток (капсул);

введенням спеціально оброблених, спучених матеріалів з великим ступенем кавернозності й низькою насипною масою;

заміною частини води вуглеводневою рідиною меншої густини;

завдяки комбінованим або мішаним способам.

У вітчизняній практиці знайшли застосування полегшені тампонажні цементи ОЦГ - на основі суміші шлаку, портландцементного клінкеру і трепелу при співвідношенні компонентів 1:1 (за масою) та ОШЦ - на основі суміші шлаку і глини (наприклад бентоніту). Діапазон густини тампонажних розчинів на основі ОЦГ - 1450÷1600 кг/м³, водосумішеве відношення (В/С)=0,7÷1,1, допустимі температури застосування 40-150 °С. Діапазон густини тампонажних розчинів на основі ОШЦ - 1450-1550 кг/м³, В/С=0,85-0,95, рекомендована температура використання для ОШЦ-120 - 80-160 °С, для ОШЦ-200 - 160-220 °С [8]. Розроблені в Україні полегшені цементи ПЦТШ-Пол5-100 і ПЦТШ-Пол4-100, які вміщують 50 % цементного клінкеру та 50 % полегшувальної домішки - цеолітизованого туфу і 3 % гіпсу. Діапазон густин тампонажних розчинів на основі таких цементів у межах 1400-1500 кг/м³ при В/С=1. Рекомендована температура застосування 50-100 °С [2,8].

Автори [9] як полегшувальну домішку в модифікованих полегшених і легких тампонажних матеріалах використовують пемзу. Для зниження густини тампонажних композицій перспективним є використання ценосфер [10].

Авторами [11] розроблено тампонажну композицію з високою міцністю на основі тампонажного портландцементу з додаванням піску, перероблених промислових відходів поліуретану та поверхнево-активних речовин.

У роботі [12] пропонується застосовувати в якості полегшувальної домішки порожнисті керамічні або скляні мікросфери. Полегшені тампонажні суміші із вмістом таких наповнювачів мають високу стійкість до агресивної дії кислот в процесі проведення робіт з інтенсифікації продуктивних пластів.

Дослідники [13] в полегшених тампонажних сумішах використовують домішки - вермикуліту (водні алюмосилікати магнію і заліза шаруватої будови з набухаючою решіткою (Mg, Fe²⁺, Fe³⁺)₃·[(OH)₂(Al, Si)₄·4H₂O]).

Хімічний склад змінний (%): MgO - 14-25; FeO - 1-3; Fe₂O₃ 3-17; Al₂O₃ - 10-17; SiO₂ - 34-42; H₂O - 8-15) та триполіт - малопориста опалова осадова гірська порода.

Групою авторів у Полтавському відділенні Українського державного геологорозвідувального інституту (ПВ УкрДГРІ) розроблено полегшені тампонажні суміші на основі тампонажних портландцементів ПЦТІ-100 (ПЦТІ-50) з домішками спученого перлітового піску СПП різних марок.

Розроблені тампонажні композиції, залежно від співвідношення компонентів і водосумішевого відношення (В/С), мають густину 1180-1450 кг/м³.

За своїми властивостями такі суміші відповідають вимогам існуючих стандартів щодо полегшених тампонажних матеріалів. Дослідженнями встановлено закономірності зміни густини тампонажних розчинів ρ з цих матеріалів в бік її збільшення при збільшенні тиску тужавіння P . Доведено, що залежність $\rho=f(P)$ має асимптотичну форму в інтервалі $P \in (0, 1; 15, 0 \text{ МПа})$ [14].

Постановка завдання. Основне завдання дослідження - одержання статистичної моделі міцності тампонажного каменю з додаванням полегшеного матеріалу - спученого перлітового піску.

При цьому автори акцентують увагу на характері впливу полегшувальної добавки на міцність отриманого тампонажного каменю, точніше, особливий інтерес викликає питання можливого негативного впливу на міцність тампонажного каменю такої добавки та оцінювання кількісних характеристик цього впливу.

Викладення матеріалу та результати. Щоб вирішити поставлену задачу, було прийнято рішення, для спрощення планування експерименту представити склад сухої фази тампонажної суміші у вигляді співвідношення портландцементу ПЦТІ-100 до полегшувальної домішки (табл. 1).

Таблиця 1

Співвідношення вмісту портландцементу до вмісту спученого перлітового піску

Вміст портландцементу (ПЦТ-100), %	Вміст спученого перлітового піску (СПП), %	Співвідношення вмісту ПЦТ-100 до СПП
95,0	5	19
94,1	5,9	16
92,9	7,1	13
91,0	9,0	10
88,9	11,1	8

Для розробки статистичної моделі застосований ротатбельний 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: співвідношення вмісту портландцементу до полегшувальної домішки (спученого перлітового піску) 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, взаємнезалежності, однозначності, яким повинні задовольняти вхідні фактори при плануванні експерименту. Область факторного простору представлено в табл. 2.

Таблиця 2

Область факторного планування

Фактор	Код фактора	Одиниця вимірювання	Рівні факторів				
			-1,68179	-1	0	1	1,68179
			8	10	13	16	19
			0,69	0,74	0,81	0,88	0,928
Температура	X_3	°C, (K)	24,77 (297,77)	35 (308)	50 (323)	65 (338)	75,23 (348,23)

За допомогою комп'ютерної програми STATGRAPHICS Plus for Windows отримана план-матриця експерименту, реалізована в лабораторних умовах (табл. 3).

Таблиця 3

Матриця планування експерименту та експериментальні дані

X_1	X_2	X_3	G , МПа
-1	-1	-1	3,75
1	-1	-1	3,9
-1	1	-1	2,25
1	1	-1	2,35
-1	-1	1	4,65
1	-1	1	4,8
-1	1	1	2,8
1	1	1	3
-1,68179	0	0	3,03
1,68179	0	0	2,50
0	-1,68179	0	5,52
0	1,68179	0	2,62
0	0	-1,68179	2,35
0	0	1,68179	3,29
0	0	0	3,39
0	0	0	3,39

Обробка результатів лабораторних досліджень проведена з використанням комп'ютерної системи STATGRAPHICS Plus for Windows. На рис. 1 представлено паретто-графік і графік порівняння розрахункових та експериментальних даних. Коефіцієнт детермінації $R^2=97,28\%$, показник втрат узгодженості функції Lack-of-fit $P=0,1609$, а стандартна помилка оцінки $SE=0,252$, що свідчить про адекватність регресійної моделі.

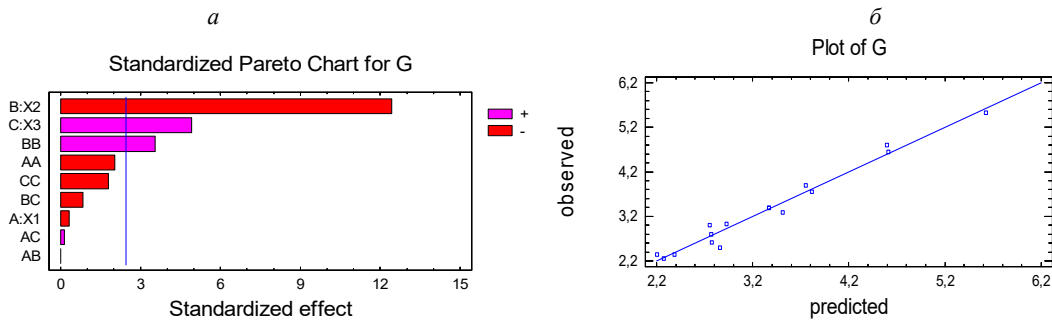


Рис. 1. Статистичні оцінки регресійної моделі: *a* - Парето-графік (вертикальна лінія відповідає 95% значущості коефіцієнтів); *б* - графік порівняння експериментальних (observed) і розрахованих (predicted) значень цільової функції

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

З Парето-графіка (див. рис. 1а) видно, що при 95% довірчій ймовірності, статистичну значущість мають коефіцієнти моделі X_2 і X_3 , при цьому коефіцієнт X_1 є статично незначущим. Тобто, аналітично підтверджується, що співвідношення вмісту портландемента (ПЦТІ-100) до полегшувальної домішки не спричиняє значного впливу на міцність тампонажного каменю в заданому діапазоні рецептур.

У загальному вигляді отримано таке рівняння регресії

$$G = 3,36785 - 0,0213335 \cdot X_1 - 0,847721 \cdot X_2 + 0,335428 \cdot X_3 - 0,167492 \cdot X_1^2 + 0,0125 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,293907 \cdot X_2^2 - 0,075 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,148046 \cdot X_3^2. \quad (1)$$

З урахуванням значущості коефіцієнтів рівняння регресії при 95% довірчій ймовірності рівняння (1) набуває вигляду

$$G = 3,36785 - 0,847721 \cdot X_2 + 0,335428 \cdot X_3 - 0,293897 \cdot X_2^2. \quad (2)$$

При розширенні інтервалу оцінку статистичних параметрів до 90%, отримуємо наступний Парето-графік (рис. 2)

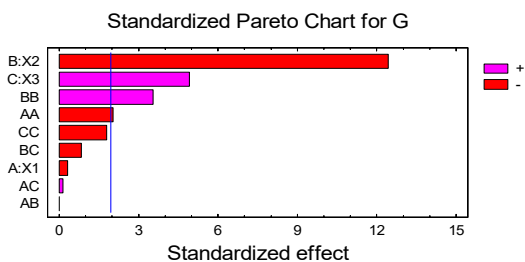


Рис. 2. Парето-графік статистичної оцінки регресійної моделі при 90% значущості коефіцієнтів. При 90% довірчій ймовірності статистичної значущості набуває також складова полінома X_1^2

Рівняння регресії отримує вигляд

$$G = 3,36785 - 0,847721 \cdot X_2 + 0,335428 \cdot X_3 - 0,167492 \cdot X_1^2 \quad (3)$$

На рис. 3 показано тривимірні перетини цільової функції $G(X_1, X_2, X_3)$ та відповідні контурні криві.

Отже, аналізуючи Парето-графік (див. рис. 1а) та рівняння регресії (2) констатуємо, що найбільш значимим для визначення цільової функції $G(X_1, X_2, X_3)$ є фактор X_2 - водосумішеве відношення. При цьому залежність $G(X_2)$ обернено пропорційна. За значущістю члени моделі-полінома розміщуються в наступному порядку: X_3, X_3^2 , а при довірчій ймовірності 90% цей ряд має вигляд: X_2, X_3, X_3^2, X_1^2 .

Згідно із одержаними гіперповерхнями і контурними кривими 3, 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, а критичний радіус зародків твердої фази зменшується.

Внаслідок цього, число контактів зрощування мікрокристалів зростає, і вони в результаті втрачати надлишкової води та інтенсивного обростання новими гідратними утвореннями зміцнюються [3]. Відповідно зростає міцність кристалічної решітки.

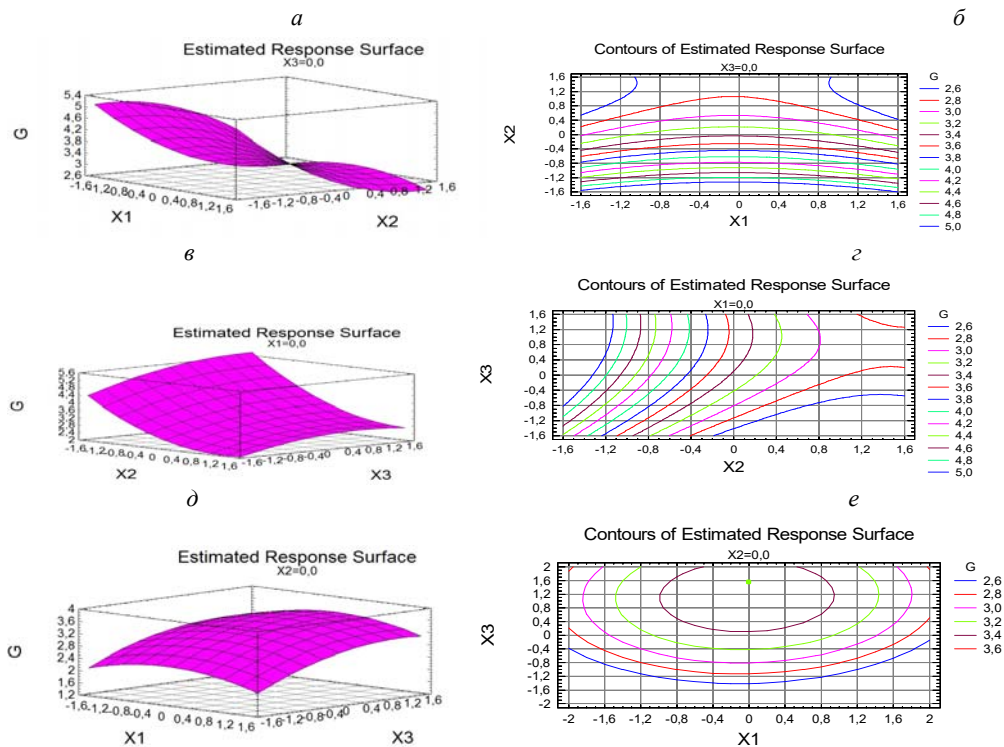


Рис. 3. Тривимірні перетини та контурні криві цільової функції $G(X_1, X_2, X_3)$: а - тривимірна поверхня міцності G для факторів X_1, X_2 при $X_3=0$; б - тривимірна поверхня міцності G для факторів X_2, X_3 при $X_1=0$; в - тривимірна поверхня міцності G для факторів X_1, X_3 при $X_2=0$; г - контурні криві цільової функції G для факторів X_1, X_2 при $X_3=0$; д - контурні криві цільової функції G для факторів X_2, X_3 при $X_1=0$; е - контурні криві цільової функції G для факторів X_1, X_3 при $X_2=0$

Але в полегшених тампонажних композиціях з домішками спученого перлітового піску прямо пропорційна залежність міцності від впливу умов тужавіння цементу спостерігається до певного критичного значення температури. Це зумовлено особливістю гідратації суміші портландцементних мінералів із спученим перлітовим піском. При високих температурах гідратні новоутворення таких композицій є нестійкими.

Разом з тим, за гіперповерхнями простежується зростання залежності $G(X_1)$ при малих значеннях фактора X_2 . При збільшенні водосумішевого відношення X_2 це зростання $G(X_1)$ нівелюється. Отже, фактор водосумішевого співвідношення домінує над фактором співвідношення портландцементу і полегшувальної домішки, що підтверджено Парето-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 й призводить до зниження міцності.

При більших значеннях фактора X_3 - температури, наявне стрімкіше зростання функції $G(X_2)$, ніж при мінімальних значеннях X_2 . У той же час, при мінімальних значеннях X_2 простежується стрімкіше зростання залежності $G(X_3)$, ніж при максимальних X_2 . Крім того, діапазон зростання міцності більший для фактора X_2 . Це свідчить про те, що вплив водосумішевого відношення на міцність цементного каменю превалює над впливом умов тужавіння (температури при відповідних значеннях пластового тиску).

На тривимірних перетинах цільової функції $G(X_1, X_3)$ спостерігаємо прямо пропорційну залежність $G(X_3)$ і відповідне нівелювання фактора X_1 .

Аналогічна картина спостерігається на контурних кривих цільової функції. Важливо підкреслити, що результатом моделювання є визначення точки оптимуму при конкретних значеннях $X_1=-0,00589592$; $X_2=-1,68178$; $X_3=1,55811$, міцність при таких рівнях - відповідно становить 5,98 МПа.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Одержана статистична математична модель міцності цементного каменю з полегшеного (легкого) тампонажного матеріалу на осно-

ві тампонажного портландцементу ПЦТІ-100 і модифікатора-наповнювача спученого перлітового піску залежно від складу цементного розчину і умов тужавіння.

На основі аналізу результатів моделювання показано, що введення полегшувальної добавки до тампонажної суміші в кількості до 11 % на суху масу негативно не впливає на міцність цементного каменю.

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 значимим є фактор X_2 - водосумішеве відношення. Далі за значимістю члени моделі-полінома розміщуються в наступному порядку: X_3, X_3^2 , а при довірчій імовірності 90 % цей ряд має вигляд: X_2, X_3, X_3^2, X_1^2 .

Встановлено, що гіперповерхня $G(X_1, X_3)$ має точку екстремуму, що дозволяє оптимізувати за факторами X_1, X_3 склад тампонажної суміші. Максимальна міцність тампонажного каменю $G=5,98$ МПа має місце в точці оптимуму з координатами: $X_1=-0,00589592$; $X_2=-1,68178$; $X_3=1,55811$.

Отримана математична модель є адекватною і повністю підтверджується фізико-хімічними процесами, що відбуваються при тужавінні тампонажного розчину.

Список літератури

1. Концепція геодинамічного походження аномальних пластових тисків в осадовій оболонці земної кори [Електронний ресурс] / **О. О Орлов., М. І. Євдошук, В. Г. Омельченко, О. М. Трубенко** // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2007. – № 4 (25). – С. 18–23. Режим доступу: <http://rrngr.nung.edu.ua/sites/rrngr.nung.edu.ua/files/journals/024/07000zk.pdf>
2. **Орловський В.М.** Тампонажні матеріали, що розширюються при твердінні: монографія / **В.М. Орловський**. – Полтава, 2015. – 129 с.
3. **Горський В. Ф.** Тампонажні матеріали і розчини / **В.Ф. Горський**. – Чернівці, 2006 – 524 с.
4. **Балицкая З. А.** Тампонажные растворы для глубоких скважин / **З. А. Балицкая, Верещака И. Г., Сачков В. В.** и др. – Москва: Недра, 1976. – 120 с.
5. **Булатов А. И.** Тампонажные материалы / **А. И. Булатов, В. С. Данюшевский**. – Москва: Недра, 1987. – С. 164-167
6. **Данюшевський В.С.** Справочное руководство по тампонажным материалам / **В. С. Данюшевский, Р. М. Алиев, И. Ф. Толстых**. – Москва: Недра, 1987. – 373 с.
7. **Broni-Bediako E., Ogbona F. Joel and Grace Ofori-Sarpong** // Oil and Gas Research. – Volume 2. – Issue 2. – 2016. – P 112. – Doi:10.4172/ogr.1000112. Access mode https://www.researchgate.net/publication/303875122_Oil_Well_Cement_Additives_A_Review_of_the_Common_Types
8. **Бойко В.С.** Технологія розробки нафтових родовищ / **В.С. Бойко**. – Івано-Франківськ., Нова Зоря, 2011. – 509 с.
9. Properties of Lightweight Cement Mortar Containing Treated Pumice and Limestone / **Hesham Alsharie, Talal Masoud, Aziz Ibrahim Abdulla and Aseel Ghanem** // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2015. – Volume 10. – Issue 5. – P. 96–101. DOI: 10.3923/jeasci.2015.96.101
10. **Asad Hanif.** Utilizing Fly Ash Cenosphere and Aerogel for Lightweight Thermal Insulating Cement-Based Composites [Electronic resource] / **Asad Hanif, Pavithra Parthasarathy, Zongjin Li** // International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering. – Volume 11. – Issue 2. – 2017. – P 71–77. Access mode: <http://waset.org/publications/10006243/utilizing-fly-ash-cenosphere-and-aerogel-forlightweight-thermal-insulating-cement-based-composites>
11. Lightweight Polyurethane Mortar with Structural Properties [Electronic resource] / **Horgnies V., Matthieu M.; Arroyo R., Rodríguez A., Gutierrez-Gonzalez S.** // Advanced Materials Research. – Zurich. – 2015. – Volume 1129. – P. 581-585 doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1129.581. Access mode: <https://www.researchgate.net/publication/282151488>
12. Durability of Lightweight Slurries for Oilwell Cementing [Electronic resource] / **Balthar V. K. C. B. L. M., Toledo Filho R. D., E. de Moraes Rego Fairbairn, C. R. de Miranda** // Key Engineering Materials. Switzerland. – Trans Tech Publications. – 2016. – Volume 711. – P. 203–210 doi: 10.4028. Access mode: <https://www.scientific.net/KEM.711.203>
13. **A. S. Bubnov.** The effect of lightweight agents on the density of cement slurry applied during oil and gas well drilling / **A. S. Bubnov, V. S. Khorev and I. A. Boyko**. // Scientific and Technical Challenges in the Well Drilling Progress IOP Publishing IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – Volume 24 012008 doi:10.1088/1755-1315/24/1/012008
14. **В.М. Орловський.** Нові полегшені і легкі тампонажні матеріали / **В.М. Орловський, С.Г. Михайленко, О.В. Лужаниця** // Науковий вісник. – Івано-Франк. нац. тех. унів. нафти і газу. – 2010. – №3. – С. 10 – 14.
15. **Сергеев П. В., Білецький В. С.** Комп'ютерне моделювання технологічних процесів переробки корисних копалин: практикум / **Сергеев П. В., Білецький В. С.** – Маріуполь: Східний видавничий дім, 2016. – 119 с.

Рукопис подано до редакції 11.03.17