

УДК 691.542

**ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ПОМЕЛУ ТАМПОНАЖНОГО ЦЕМЕНТУ
ДЛЯ ДОСЯГНЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗТІКАННЯ ТА
ВОДОВІДДІЛЕННЯ ЦЕМЕНТНОГО ТІСТА**

**OPTIMIZATION OF THE GRINDING PROCES OF OILWELL CEMENT
TO ACHIVE OPTIMAL SPREADING AND BLEEDING OF CEMENT
PASTE**

Кротюк О. І. аспірант, ORCID: 0009-0007-2712-8644, **Дворкін Л.Й.**, д.т.н., професор, ORCID: 0000-0001-8759-6318 (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Krotiuk O. I. graduate student, ORCID: 0009-0007-2712-8644, **Dvorkin L.J.**, doctor of technical sciences, professor, ORCID: 0000-0001-8759-6318 (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

В статті викладені виробничі та лабораторні дослідження технології тампонажного цементу, наведені залежності які дозволяють забезпечити режимні параметри помелу, що забезпечують мінімальне водовідділення та підвищене розтікання цементного тіста.

The article describes production and laboratory research of oilwell cement technology, gives the dependencies that allow to ensure the operational parameters of grinding, which ensure minimal bleeding and increased spreading of the cement paste. During this research has been used real cement mill and laboratory mill for comparing results. The purpose of the research was to determine the influence of the specific surface area of cement, the grain composition of cement and the quantity of the loading of the cement mill on the parameters of the finished cement at the output. The conducted cycle of research made it possible to obtain quantitative dependences of the influence of the specific surface of cement, SO₃ content, loading coefficients of the mill chambers, the residue on the sieve 0045 to the bleeding and spreading of the cement paste. This research had made by three different ways. At the first research we discover that when quantity of loading first and second chamber of cement mills are high - the bleeding is low, which is good for the quality of cement. At the second research we discover that highest level of specific surface of the cement get bleeding lowest. At the first and second researches we can observe that highest SO₃ content get bleeding lowest, but spreading of cement paste get lowest too which is not good according to the quality of cement. During researches at the laboratory mill we ensure that SO₃

content has been made the same influence like we discover during production tests on the cement mills.

Ключові слова: планування, модель, тампонажний цемент, питома поверхня цементу, вміст SO_3 , водовідділення, розтікання.
planning, model, oilwell cement, specific surface area of cement, SO_3 content, bleeding, spreading.

Постановка мети і задач досліджень. Згідно ДСТУ Б В.2.7-88-99 ПОРТДАНДЦЕМЕНТИ ТАМПОНАЖНІ, ТЕХНІЧНІ УМОВИ [1], є ряд вимог які необхідно досягти, щоб цемент даного типу відповідав нормам, що наведені в табл. 1. В даній статті наведені результати досліджень виконаних для бездобавочного портландцементу ПЦТ І.

Метою досліджень було визначити вплив питомої поверхні цементу, зернового складу цементу та характеру завантаження цементного млина на показники готового цементу на виході.

Вимоги до тампонажного цементу ПЦТ І: Відсутність мінеральної та спеціальної добавки, яка полегшує (в тому числі природна пуцоланова) або полегшує; залишок на ситі з сіткою №008 за ГОСТ 6613 не більше 12,0 %; Питома поверхня не менше 270 m^2/kg ; водовідділення не більше 8,7 мл; розтікання цементного тіста не менше 200 мм.

Особливістю даного дослідження є проведення випробувань, як в процесі виробництва цементу, так і в умовах лабораторії. У виробничих умовах дослідження проводили на двокамерному цементному млині 3,2x15 м з кульовим завантаженням першої камери та цільпечним завантаженням другої камери. В лабораторних умовах дослідження проводили в лабораторному кульовому млині зі змішаним завантаженням. Клінкер, який використовувався для досліджень мав наступний мінералогічний склад: C_3S – 62,56%; C_2S – 9,33%; C_3A – 7,34%; C_4AF – 11,16%.

Дослідження проводили з застосуванням математичного планування експериментів [2]. Питому поверхню цементу визначали на приладі Блейн [3], зерновий склад визначали з допомогою лазерного гранулометра (Symptec HELOS/R), вміст гіпса визначали аналізатором LECO CS744, водовідділення та розтікання визначали згідно методик ДСТУ Б В.2.7-86-99 ЦЕМЕНТИ ТАМПОНАЖНІ. МЕТОДИ ВИПРОБУВАНЬ. [4]

Результати досліджень та їх аналіз. На першому етапі проводили дослідження у виробничих умовах. Обробка цих результатів дозволила отримати залежності, згідно яких можна стверджувати, що величина питомої поверхні, коефіцієнт завантаження млина та вміст гіпсу тісно пов'язані з розтіканням та водовідділенням цементного тіста. Під час проведення

виробничого експерименту продуктивність млина (час помелу шихти) приймалась за постійну. З метою дослідження взаємозв'язку коефіцієнтів завантаження камер млина, водовідділення цементного тіста та вмісту SO₃ було застосовано план В3 [2], умови планування експерименту наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Умови планування експериментів I-го етапу досліджень

Фактори		Рівень варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодовий вид	-1	0	+1	
Коефіцієнт завантаження 1-ї камери (K _{зав 1})	x ₁	0,2	0,21	0,22	0,01
Коефіцієнт завантаження 2-ї камери (K _{зав 2})	x ₂	0,28	0,3	0,32	0,02
Вміст SO ₃ , %	x ₃	2,05	2,75	3,55	0,7

Таблиця 2

Матриця експериментальних результатів I-го етапу

Точки плану	Фактори			Експериментальні значення	
	x ₁	x ₂	x ₃	Водовідділення, мл	Розтікання, мм
1	0,22	0,32	3,55	5	195
2	0,22	0,32	2,05	12,2	219
3	0,22	0,28	3,55	5	170
4	0,22	0,28	2,05	9,2	204
5	0,20	0,32	3,55	5	190
6	0,20	0,32	2,05	13,1	219
7	0,20	0,28	3,55	8	210
8	0,20	0,28	2,05	8,2	212
9	0,22	0,30	2,75	12	230
10	0,20	0,30	2,75	5,9	218
11	0,21	0,32	2,75	5	181
12	0,21	0,28	2,75	9	188
13	0,21	0,30	3,55	5	202
14	0,21	0,30	2,05	6,8	215
15	0,21	0,30	2,75	6	212
16	0,21	0,30	2,75	6	212
17	0,21	0,30	2,75	6	212

Експериментальні результати, що були отримані при реалізації експериментів приведені в табл. 2.

Статистична обробка результатів дозволила отримати експериментально-статистичні моделі водовідділення (y_1), та розтікання цементного тіста (y_2).

$$y_1 = 6,39 + 0,32x_1 + 0,09x_2 - 2,15x_3 + 2,29x_1^2 + 0,34x_2^2 - 0,75x_3^2 + 0,13x_1x_2 - 0,38x_1x_3 - 1,36x_2x_3 \quad (1)$$

$$y_2 = 210,38 - 3,1x_1 + 2x_2 - 10,2x_3 + 15,53x_1^2 - 23,96x_2^2 + 0,03x_3^2 + 6,625x_1x_2 - 3,375x_1x_3 - 2,125x_2x_3 \quad (2)$$

Аналізуючи модель y_1 (1) (рис. 1, а) можна дійти висновку, що на водовідділення має великий вплив коефіцієнт завантаження другої камери млина та вміст SO_3 . При більшому коефіцієнті завантаження II-ї камери та збільшеному вмісту SO_3 в цементі - водовідділення цементного тіста різко зменшується. При середніх значеннях вмісту SO_3 – коефіцієнт завантаження другої камери не має впливу на показник водовідділення. При менших значеннях SO_3 та більшому коефіцієнту завантаження II-ї камери – водовідділення збільшується.

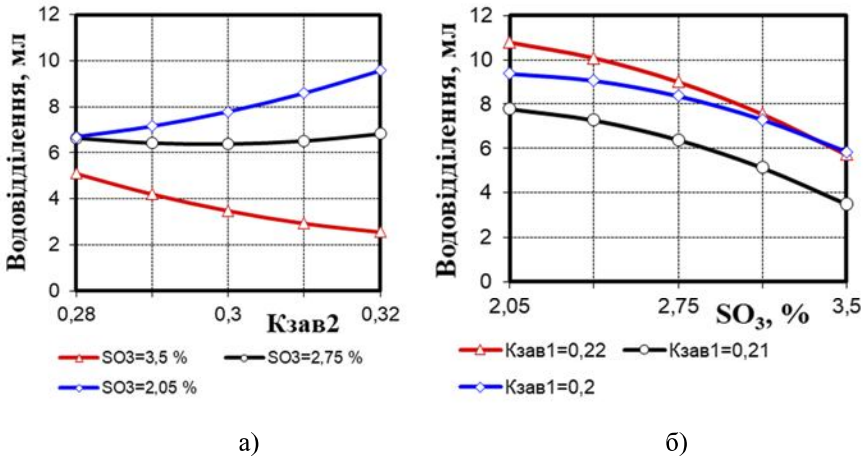


Рис. 1. Залежність водовідділення від коефіцієнту завантаження II-ї камери при різних значеннях вмісту SO_3 (а), залежність водовідділення від вмісту SO_3 при різних значеннях коефіцієнту завантаження I-ї камери (б)

Аналізуючи модель y_2 (2) на рис. 1, б можна стверджувати, що коефіцієнт завантаження I-ї камери млина також впливає на показник водовідділення. При більшому коефіцієнті завантаження – водовідділення зменшується.

Аналізуючи модель y_2 (2) можна стверджувати, що розтікання збільшується при менших значеннях SO_3 , а значення коефіцієнту завантаження I-ї камери

млина впливає неоднозначно. При середніх значеннях коефіцієнту завантаження І-ї камери млина – розтікання падає, а при менших та більших – зростає (рис. 2. а та б).

Аналізуючи отримані моделі y_1 та y_2 можна стверджувати, що вхідні дані на першому етапі експерименту не враховують всіх факторів, що впливають на водовідділення та розтікання готового тампонажного цементу. Чітко простежується вплив вмісту SO_3 на водовідділення та розтікання цементного тіста.

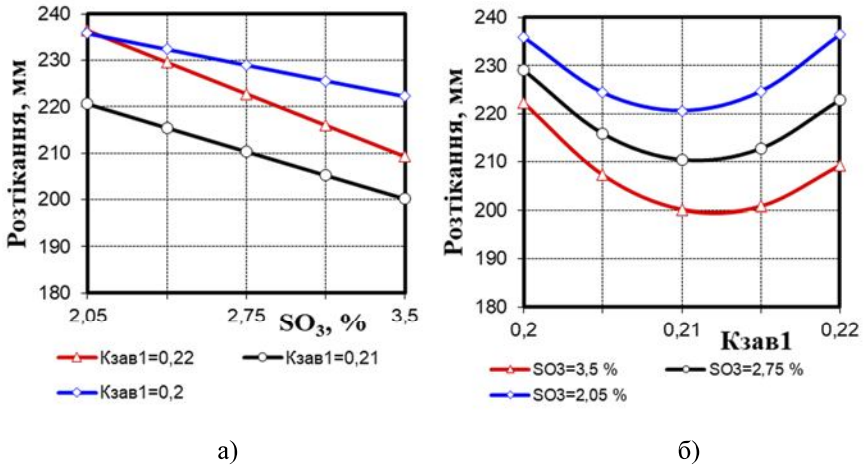


Рис. 2. Залежність розтікання від вмісту SO_3 при різних значеннях коефіцієнту завантаження І-ї камери (а), залежність розтікання від коефіцієнту завантаження І-ї камери при різних значеннях вмісту SO_3 (б)

На другому етапі дослідження згідно плану ВЗ (табл. 3), метою було дослідити вплив питомої поверхні та залишку на ситі №0045 на розтікання та водовідділення цементного тіста. В ході досліджень було виявлено, що залишок на ситі №008 (який є регламентованим згідно ДСТУ) не носить суттєвого інформативного характеру, тому під час експериментів керувались показниками залишку на ситі №0045. Експериментальні результати, що були отримані при реалізації експериментів згідно плану ВЗ приведені в табл. 4.

Статистична обробка результатів дозволила отримати експериментально-статистичну модель водовідділення (y_3) та розтікання цементного тіста (y_4).

$$y_3 = 8,18 - 1,52x_1 + 0,14x_2 - 1,84x_3 + 0,629x_1^2 - 0,07x_2^2 - 0,27x_3^2 - 0,725x_1x_2 - 0,5x_1x_3 - 0,225x_2x_3 \quad (3)$$

Таблиця 3

Умови планування експериментів II-го етапу досліджень

Фактори		Рівень варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вид	кодований вид	-1	0	+1	
Питома поверхня за Блейном, см ² /г	x ₁	3000	3250	3500	250
Залишок на ситі 0045, %	x ₂	14	17	20	3
Вміст SO ₃ , %	x ₃	2,05	2,75	3,5	0,7

Таблиця 4

Матриця експериментальних результатів II-го етапу

Точки плану	Фактори			Експериментальні значення	
	x ₁	x ₂	x ₃	Водовідділення, мл	Розтікання, мм
1	3500	20	3,5	4	160
2	3500	20	2,05	8	216
3	3500	14	3,5	5	170
4	3500	14	2,05	10	210
5	3000	20	0	9	200
6	3000	20	2,05	12,9	221
7	3000	14	3,5	9	205
8	3000	14	2,05	10,1	215
9	3500	17	2,75	8,1	201
10	3000	17	2,75	9,3	190
11	3250	20	2,75	8,8	187
12	3250	14	2,75	7,2	190
13	3250	17	3,5	5,6	176
14	3250	17	2,05	10	210
15	3250	17	2,75	8,3	191
16	3250	17	2,75	8,3	191
17	3250	17	2,75	8,3	191

$$y_4 = 190,43 - 7,4x_1 - 0,6x_2 - 16,1x_3 + 6,16x_1^2 - 0,835x_2^2 + 3,66x_3^2 - 0,625x_1x_2 - 8,125x_1x_3 - 3,375x_2x_3 \quad (4)$$

Аналізуючи модель y_3 (3), можна стверджувати, що збільшення питомої поверхні цементу знижує водовідділення, а при зменшенні питомої поверхні – водовідділення зростає. Згідно виконаних експериментів також слідує, що при збільшеному вмісту SO_3 та питомої поверхні - водовідділення зменшується. Графіки отриманих залежностей приведені на рис. 3.

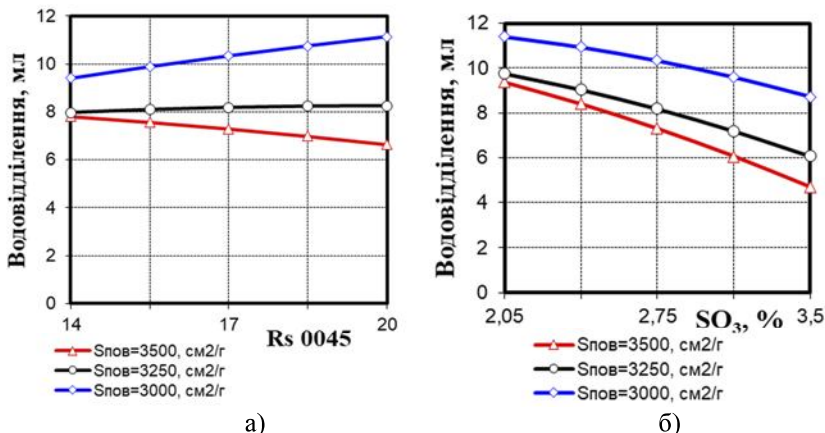


Рис. 3. Залежність водовідділення від залишку на ситі №0045 при різних значеннях питомої поверхні (а), залежність водовідділення від вмісту SO_3 при різних значеннях питомої поверхні (б)

Розглядаючи модель y_4 (4), розтікання цементного тіста, можна стверджувати, що при менших показниках питомої поверхні – показник розтікання збільшується. При цьому залишок на ситі №0045 ніякого впливу не має, що видно з графіку на рис. 4 а).

Аналізуючи моделі y_3 та y_4 можна стверджувати, що величина вмісту SO_3 має значний вплив на показник водовідділення та розтікання. Також зменшення питомої поверхні цементу впливає на підвищення розтікання цементного тіста. Було виявлено, що залишок на ситі №0045 суттєвого впливу на водовідділення та розтікання не має. При збільшенні вмісту SO_3 – показник розтікання різко падає, що видно на графіку рис. 4, б).

Задля підтвердження впливу вмісту SO_3 на водовідділення та розтікання було проведено III-й етап дослідів на лабораторному млині. Досліди проводились з додаванням різної кількості гіпсу при однаковому часі помелу

клинкеру. На рис. 5 видно, що зі збільшенням SO_3 є динаміка на зменшення водовідділення.

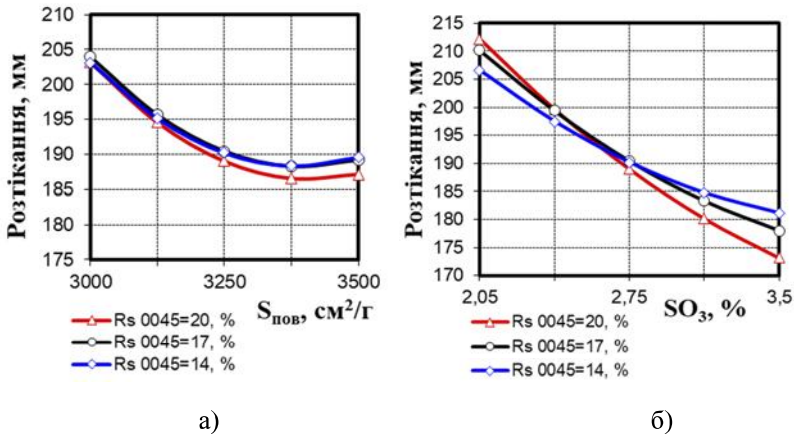


Рис. 4. Залежність розтікання від питомої поверхні при різних значеннях залишку на ситі №0045 (а), залежність розтікання від вмісту SO_3 при різних значеннях залишку на ситі №0045 (б)

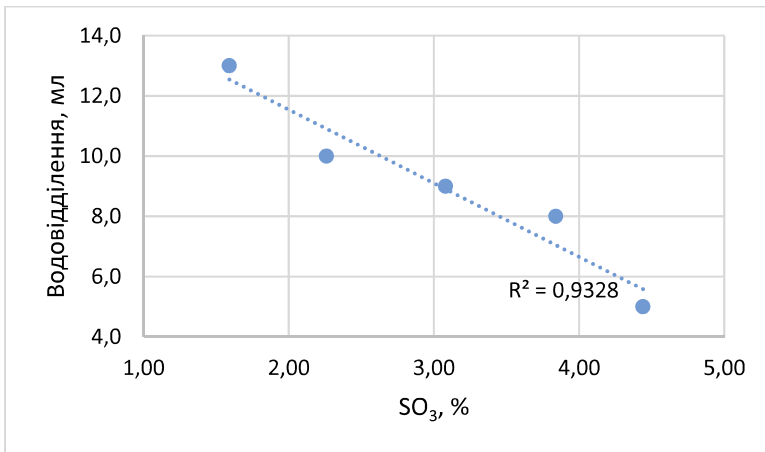


Рис. 5. Залежність водовідділення від вмісту SO_3

При аналізі даних, отриманих при помелі клинкеру на лабораторному млині, можна також зауважити, що при збільшеному вмісту SO_3 – величина розтікання зменшується, що видно на рис. 6.

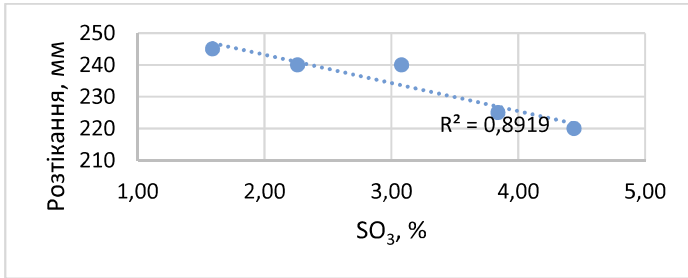


Рис. 6. Залежність розтікання цементного тіста від вмісту SO₃

Висновки та рекомендації. Проведений цикл досліджень дозволив отримати кількісні залежності впливу питомої поверхні цементу, вмісту SO₃, коефіцієнтів завантаження камер млина, залишку на ситі №0045 до водовідділення та розтікання цементного тіста.

Аналіз отриманих залежностей дозволяє стверджувати, що максимальна розтічність цементного тіста досягається при низьких показниках питомої поверхні та зменшеному вмісту SO₃. А максимально низьке водовідділення досягається при збільшеному вмісту SO₃, тому при виробництві цементу тампонажного необхідно чітко дотримуватись вимог наведених в статті задля досягнення необхідних параметрів готового продукту.

1. ДЕРЖАВНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ. Будівельні матеріали. ПОРТЛАДЦЕМЕНТИ ТАМПОНАЖНІ. Технічні умови. ДСТУ Б В.2.7-88-99. Державний комітет будівництва, архітектури та житлової політики України.-Київ, 1999.

DERZhAVNYI STANDART UKRAINY. Budivelni materialy. PORTLADTsEMENTY TAMPONAZhNI. Tekhnichni umovy. DSTU B V.2.7-88-99. Derzhavnyi komitet budivnytstva. arkhitektury ta zhytlovoi polityky Ukrainy. - Kyiv, 1999.

2. Дворкін Л. Й. Експериментально-статистичне моделювання при проектуванні складів бетонів : навчальний посібник / Л. Й. Дворкін. – К.: Видавничий дім «Кондор», 2020. – 205 с.

Dvorkin L. Y. Eksperymentalno-statystychne modeliuвання pry proektuvanni skladiv betoniv : navchalnyi posibnyk / L. Y. Dvorkin. – K.: Vydavnychyi dim «Kondor», 2020. – 205 s.

3. НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ. Будівельні матеріали. ЦЕМЕНТИ. МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ТОНКОСТІ ПОМЕЛУ. ДСТУ Б В.2.7-188:2009. Мінрегіонбуд України. – Київ, 2010.

NATsIONALNYI STANDART UKRAINY. Budivelni materialy. TsEMENTY. METODY VYZNACHENNIa TONKOSTI POMELU. DSTU B V.2.7-188:2009. Minrehionbud Ukrainy. – Kyiv, 2010.

4. ДЕРЖАВНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ. Будівельні матеріали. ПОРТЛАДЦЕМЕНТИ ТАМПОНАЖНІ. МЕТОДИ ВИПРОБУВАНЬ. ДСТУ Б В.2.7-86-99. Державний комітет будівництва, архітектури та житлової політики України. - Київ, 1999.

DERZhAVNYI STANDART UKRAINY. Budivelni materialy. PORTLADTsEMENTY TAMPONAZhNI. METODY VYPROBUVAN. DSTU B V.2.7-86-99. Derzhavnyi komitet budivnytstva, arkhitektury ta zhytlovoi polityky Ukrainy. - Kyiv, 1999.