

УДК 624.012.35:666.982.2(031)

**ВПЛИВ КОМПЛЕКСНОЇ АКТИВНОЇ МІНЕРАЛЬНОЇ ДОБАВКИ РІЗНОГО СКЛАДУ НА МІЦНІСТЬ БЕТОНУ**

**ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ АКТИВНОЙ МИНЕРАЛЬНОЙ ДОБАВКИ РАЗНОГО СОСТАВА НА ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА**

**EFFECT OF COMPLEX ACTIVE MINERAL SUPPLEMENTS IN DIFFERENT COMPOSITION CONCRETE STRENGTH**

**Приймаченко А.С.** (МЦ Баухемі), **Пушкарьова К.К.** д.т.н., проф. (Київський національний університет будівництва і архітектури), **Шейніч Л.О.** д.т.н., проф. (Державне підприємство Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій), **Гедулян С.І.** (Одеська державна академія будівництва і архітектури)

**Примаченко А.С.** (МЦ Баухеми), **Пушкарева К.К.** д.т.н., проф. (Киевский национальный университет строительства и архитектуры), **Шейнич Л.А.** д.т.н., проф. (Государственное предприятие Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций), **Гедулян С.И.** (Одесская государственная академия строительства и архитектуры)

**Pryimachenko A.S.** (MC Bauhemi) **Pushkareva K. K.** doctor of technical sciences, prof. (Kyiv National University of Construction and Architecture) **Sheynich L. A.** doctor of technical sciences, prof. (State Enterprise State Scientific-Research Institute of Building Constructions) **Hedulyan S. I.** (Odessa State Academy of Construction and Architecture)

**З використанням математичного планування експерименту досліджено вплив комплексної мінеральної добавки, що складається з золи-винесення, метаксаоліну та мікрокремнезему, на властивості бетонної суміші та отриманого бетону. Показано, що при проектуванні складів багатофункціональних бетонів доцільно застосовувати (5...15) мас.% добавки, що містить (60...70) мас.% золи винесення та (30...40) мас.% метаксаоліну. Це дозволяє збільшити міцність на 30% при одночасному зниженні витрати цементу на 15% порівняно з контрольним складом бетону.**

**С использованием математического планирования эксперимента исследовано влияние комплексной минеральной добавки, которая состоит из золы-уноса, метаксаолина и микрокремнезема, на свойства бетонной смеси и затвердевшего бетона. Показано, что при**

**проектировании составов многофункциональных бетонов целесообразно использовать (5...15) мас.% добавки, которая включает (60...70) мас.% золы-унос и (30...40) мас.% метаксаолина. Это позволяет увеличить прочность на 30% при одновременном снижении расхода цемента на 15% по сравнению с контрольным составом бетона.**

**With the use of the mathematical planning of experiment influence of complex mineral addition (that consists of fly ash, metakaolin and silica fume) is investigational on properties of concrete mixture and hardening concrete. It is shown that at planning of compositions of multifunction concretes it is expedient to use (5...15) % addition that includes (60...70) % fly ash and (30...40) % metakaolin. It allows to increase strength on 30% at the simultaneous decline of expense of cement on 15% as compared to control composition of concrete.**

**Ключові слова:**

Математичне планування, мінеральні добавки, зола винесення, метаксаолін.

Математическое планирования, минеральные добавки, зола-унос, метаксаолин.

Mathematical planning, mineral addition, fly ash, metakaolin.

Введення активних мінеральних добавок до складу бетону дозволяє економити портландцемент та отримувати спеціальні бетони, що мають незначне тепловиділення і застосовуються для масивних конструкцій, спеціальних корозійно- та жаростійких бетонів тощо. Крім того, такі активні мінеральні добавки широко використовуються при отриманні багатофункціональних бетонів, високоміцних та самоущільнюючих. Вони також входять до складу ремонтних композицій, сухих будівельних сумішей тощо. Насьогодні проведено багато робіт українськими та закордонними вченими, які показали доцільність введення до складу бетону мінеральних наповнювачів, таких як зола винесення [1,2,3], мікрокремнезем [1], метаксаолін [4,5]. В той же час сумісна дія цих добавок та пріоритетність їх вибору в складі комплексних активних мінеральних добавок (КАМД) багато в чому визначають ефективність виробництва і застосування матеріалів, але нажалє це питання вивчено не достатньо.

**Метою досліджень є вивчення сумісної дії золи-винесення, мікрокремнезему та метаксаоліну в складі комплексної мінеральної добавки на рухливість бетонної суміші та міцність отриманого бетону.**

**Методика досліджень.** Як сировинні матеріали використовували портландцемент типу ПЦІІ/А-Ш-400 ДСТУ Б В. 2.7-46 виробництва Волиньцемент, Дніпровський та Воскресенський кварцові піски згідно ДСТУ Б В.2.7-32-95, крупний заповнювач згідно ДСТУ Б В.2.7-75-98, золу винесення Ладижинської ТЕС за ДСТУ Б В.2.7-205 а також мікрокремнезем

(Centrlit Fume SX), метакаолін (Centrlit NC) та суперпластифікатор PCE FK 63.30 виробництва МЦ Баухемі.

Для оцінки впливу виду і кількості комплексної активної мінеральної добавки згідно плану експерименту [10], що містить 15 дослідних точок (табл.2), варіювали вид трьох компонентів, що входили до складу комплексної мінеральної активної добавки: зола винесення  $-V_1$ , метакаолін  $-V_2$  та мікрокремнезем  $-V_3$ . Компоненти комплексної мінеральної активної добавки ( $V_1+V_2+V_3$ ) утворюють сумішеву систему з лінійно зв'язаними елементами (їх долі зв'язані рівнянням  $v_1+v_2+v_3 = 1$ ). Фактори базової рецептури бетону – це вміст комплексної активної мінеральної добавки ( $X_1=10\pm 5\%$ ) і суперпластифікатора PCE FK 63 ( $X_2=1,35\pm 0,45\%$  від маси в'язучої речовини).

Межі варіювання факторів наведені у таблиці 1. При плануванні експерименту передбачалось, що вміст в'язучої речовини (цемент+КАМД) завжди дорівнює 400 кг на  $1\text{м}^3$  бетону. У контрольному складі бетону для аналізу властивостей бетону з КАМД витрата портландцементу типу ПЦІІ/А-Ш-400 ДСТУ Б.В.2.7-46 складала також 400кг на  $1\text{м}^3$ . Крім того, всі бетонні суміші мали рухливість Р4, а бетони тверділи в нормальних умовах. У таблиці 2 наведена матриця експерименту, витрати модифікуючих добавок бетону – суперпластифікатора та комплексної мінеральної добавки з розшифровкою її складу.

Як функції відгуку прийняті зміна рухливості бетонної суміші у часі та міцність при стиску бетонів після твердіння протягом 7 та 28 діб. Результати експерименту наведені у таблицях 3,4.

Таблиця 1

Фактори, що варіюються, та межі їх варіювання

Фактори, що підлягають варіюванню	Познака фактору	Оди-ниця вимірювання	Межі варіювання факторів у вигляді	
			Натура-льному	кодова-ному
Вміст золи винесення	$V_1$	%	0-100	0...+1
Вміст метакаоліну	$V_2$	%	0-100	0...+1
Вміст мікрокремнезему	$V_3$	%	0-100	
Вміст КАМД по відношенню до витрати в'язучої речовини (цемент + КАМД)	$X_1$	%	5-15	-1...+1
Вміст суперпластифікатора	$X_2$	%	0,5-1	-1...+1

Таблиця 2

**Матриця планування експерименту та межі варіювання факторів у натуральному вигляді**

№ п/п	Кодування факторів					Межі варіювання факторів, кг				
	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>
1	0,3	0,3	0,3	1	0	20	20	20	60	3
2	0	0	1	1	-1	0	0	60	60	2
3	0	0	1	-1	0	0	0	20	20	3
4	0	0	1	1	1	0	0	60	60	4
5	0	1	0	1	-1	0	60	0	60	2
6	0	1	0	1	1	0	60	0	60	4
7	0	1	0	-1	-1	0	20	0	20	2
8	1	0	0	-1	0	20	0	0	20	3
9	1	0	0	1	-1	60	0	0	60	2
10	1	0	0	1	1	60	0	0	60	4
11	0	0,5	0,5	-1	1	0	10	10	20	4
12	0	0,5	0,5	0	-1	0	20	20	40	2
13	0,5	0	0,5	-1	-1	10	0	10	20	2
14	0,5	0	0,5	0	0	20	0	20	40	3
15	0,5	0,5	0	0	1	20	20	0	40	4

Таблиця 3

**Досліджувані склади бетонів**

№ складу бетону	Цемент, кг	Вода, дм <sup>3</sup>	Зола, кг	Centrilit NC, кг	Centrilit Fume SX, кг	PCE FK 63.30, %	Пісок Днепр., кг	Пісок Вознес, кг	Щебінь, кг,фр	
									5/10	10/20
1	340	140	20	20	20	1,35	280	369	276	922
2	340	160	0	0	60	0,90	272	358	269	896
3	380	160	0	0	20	1,35	272	358	269	896
4	340	160	0	0	60	1,80	272	358	269	896
5	340	175	0	60	0	0,90	266	351	263	876
6	340	152	0	60	0	1,80	291	384	288	960
7	380	154	0	20	0	0,90	274	361	271	903
8	380	148	20	0	0	1,35	277	364	273	911
9	340	145	60	0	0	0,90	278	366	275	915
10	340	145	60	0	0	1,80	278	366	275	915
11	380	145	0	10	10	1,80	278	366	275	915

Продовження табл.3

12	360	180	0	20	20	0,90	264	348	261	870
13	380	155	10	0	10	0,90	274	361	271	902
14	360	150	20	0	20	1,35	276	363	273	909
15	360	140	20	20	0	1,80	280	369	276	922
Контр.	400	160	0	0	0	0,90	269	358	269	896

Таблиця 4

Результати дослідження властивостей бетонної суміші та бетонів на її основі

№ складу бетону	Рухливість бетонної суміші, см, через,хв			Міцність бетону на стиск, МПа, через, діб	
	10	60	120	7	28
1	25	25	24	46,1	66,3
2	21	19	10	49,2	53,6
3	23	23	21	55,1	64,4
4	23	20	14	49,65	62,5
5	23	19	14	48,3	58,75
6	23	22	19	57,3	76,2
7	22	18	16	41,9	49,1
8	23	22	21	52,8	57,7
9	23	21	19	39,1	40
10	23	22	20	51,3	55,4
11	25	24	23	54,3	72,1
12	23	19	12	40,4	52,19
13	25	23	20	37,7	55,15
14	23	20	17	62,9	67,1
15	23	22	19	63,9	78,1
Контр.	21	20	8	46,7	51,9

Отримані експериментально-статистичні моделі класу «склад-технологія-властивості» структуровані за групами факторів і їх взаємодіями:

$$\begin{array}{c}
 \boxed{Y} \\
 \begin{array}{l}
 \boxed{\begin{array}{l} +A_1V_1 \\ +A_2V_2 \\ +A_3V_3 \end{array}} \quad \boxed{\begin{array}{l} +A_{12}V_1V_2 + A_{13}V_1V_3 + A_{23}V_2V_3 \\ (b) \end{array}} \\
 \boxed{\begin{array}{l} +b_{11}x_1^2 + b_{12}x_1x_2 \\ +b_{22}x_2^2 \end{array}} \quad \boxed{\begin{array}{l} +C_{11}V_1x_1 + C_{12}V_1x_2 \\ +C_{21}V_2x_1 + C_{22}V_2x_2 \\ +C_{31}V_3x_1 + C_{32}V_3x_2 \end{array}} \quad (1) \\
 (a) \quad (d) \quad (c)
 \end{array}
 \end{array}$$

В повному вигляді залежності (1) описують індивідуальний вплив компонентів комплексної активної мінеральної добавки (блок а), взаємодії в сумішах комплексної активної мінеральної добавки (блок b), між групової

взаємодії (блок с), вплив концентрації суперпластифікатора і комплексної активної мінеральної добавки (d). Для оцінки можливого синергізму в рецептурній системі потенціально інформативним є ефект  $A_{ij}$  від змішування двох компонентів в блоці с.

Одночасний вплив сумішевих ( $v_i$ ) і незалежних ( $x_i$ ) факторів можна оцінити при аналізі зміни трикутової діаграми «склад-властивість», що виникає під впливом факторів  $x_i$  на квадраті [10]. На рисунках 1, 2, 3 представлені діаграми зміни властивостей бетонної суміші (втрата життєздатності) та міцності бетону від його складу.

Для оцінювання життєздатності бетонної суміші було проведено порівнювання осадки її конуса через 10хв після приготування і витримки протягом 3-х годин:

$$K=OK_{10}-OK_{120}, \text{ см} \quad (2)$$

**Результати досліджень.** При проведенні аналізу моделі показника втрати рухливості бетонної суміші в часі (рисунок 1) можна відмітити, що життєздатність бетонної суміші в вибраних межах варіювання факторів в значній мірі залежить не тільки від вмісту суперпластифікатора і КАМД, але й від природи мінеральних компонентів. При «середній» витраті суперпластифікатора (1,35 %) бетонна суміш характеризується найбільшою життєздатністю. В області «середніх» дозувань суперпластифікатора підвищення до 10% кількості мінеральної добавки (незалежно від природи її складових) не здатне прискорити процес втрати осадки конуса бетонної суміші. Але при малій і значній витраті суперпластифікатора вид КАМД вже має певний вплив на життєздатність бетонної суміші.

Так, при мінімальній витраті суперпластифікатора (0,9% від маси в'язучої речовини) та комплексної активної мінеральної добавки (5% від маси в'язучої речовини) мінімальною втратою рухливості характеризуються бетонні суміші (втрата рухливості суміші за 120 хв її зберігання складає приблизно 3 см), що містять комплексну мінеральну добавку, яка приблизно складається з 90% мікрокремнезему і 10% метакаоліну або 10% мікрокремнезему і 90% метакаоліну, або 33% золи, 33% метакаоліну і 34% мікрокремнезему. При максимальній кількості КАМД і мінімальній витраті суперпластифікатора всі бетонні суміші незалежно від їх складу мають значну втрату рухливості в часі. При максимальному вмісті суперпластифікатора (1,8% від маси в'язучої речовини) і комплексної активної мінеральної добавки (15% від маси в'язучої речовини) найбільшою життєздатністю (втрата рухливості суміші за 120 хв її зберігання складає приблизно 3 см) характеризуються бетонні суміші, в яких КАМД приблизно складається з 30% золи винесення і 70% метакаоліну або 30% золи винесення, 30% мікрокремнезему і 40% метакаоліну, або 90% золи винесення і 10% метакаоліну, або 90% мікрокремнезему і 10% метакаоліну.

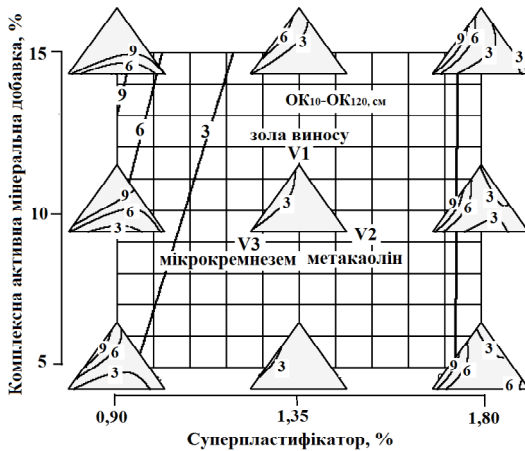


Рис. 1. Діаграма зміни рухливості бетонної суміші

В результаті моделювання міцності бетону на 7-му добу твердіння (рисунок 2) можна відмітити, що вплив складу КАМД в меншій мірі залежить від її кількості в бетоні і вмісту суперпластифікатора, ніж у випадку показника втрати рухливості бетонної суміші. При цьому найбільшою міцністю (приблизно 60 МПа) характеризуються бетони на основі бінарних сумішей КАМД.

Так, достатньо ефективними з точки зору показника міцності можуть бути бетони, що містять максимальну кількість суперпластифікатора (1,8% від маси в'язучої речовини) і КАМД (15% від маси в'язучої речовини), яка представлена 30% золи винесення та 70% метакаоліну або 10% золи винесення і 90% метакаоліну. Композиції на основі «мікрокремнезем - зола» менш ефективні, що може бути пояснено значною водопотребою мікрокремнезему порівняно з водопотребою золи винесення.

На 28 добу твердіння характер впливу складу КАМД на міцність бетону дещо змінюється. Найбільшу міцність (80 МПа) мають бетони, що містять максимальну кількість суперпластифікатора (1,8% від маси в'язучої речовини) і КАМД (15% від маси в'язучої речовини), яка включає 70% золи винесення і 30% метакаоліну або 40-60% мікрокремнезему і 60-40% метакаоліну. До менш ефективних рецептур КАМД, як і у випадку бетонів з міцністю на 7-му добу, можуть бути віднесені бетони, що містять комплексну активну мінеральну добавку на основі мікрокремнезему.

Доцільність застосування комплексної активної мінеральної добавки розглянутого складу підтверджується тим, що можливе отримання бетону, міцність якого на 30% вище ніж контрольного при одночасному зниженні витрати портландцементу на 15%.

З урахуванням технологічності отримання КАМД, краще застосовувати 2-х компонентну суміш. Склади бетонної суміші з максимальним вмістом комплексної мінеральної добавки мають найбільшу цінність, оскільки вони забезпечують економію портландцементу при збереженні потрібних експлуатаційних характеристик бетону. Ці склади орієнтовно містять 270 кг портландцементного клінкеру на 1 м<sup>3</sup> бетону.

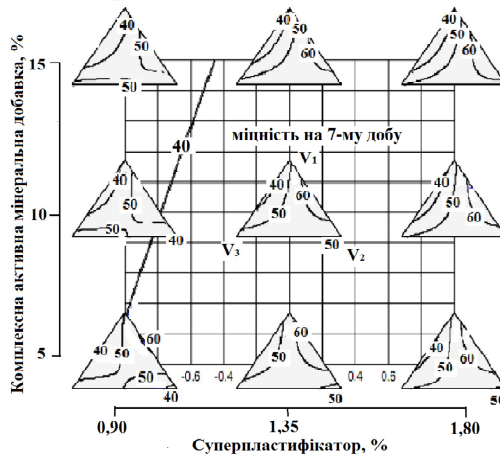


Рис. 2 Діаграма зміни міцності бетону після 7 діб твердіння

Слід відзначити, що отримані результати підтверджуються також за допомогою побудови нескладної регресійної моделі.

В основу цієї моделі покладене класичне твердження німецького вченого Курта Вальца, яке полягає в тому, що при всіх інших рівних умовах (вид цементу, умови зберігання зразків) міцність бетону обернено пропорційна до водоцементного відношення, яке визначається діленням повної кількості води на кількість цементу, витрачених на виробництво 1 м<sup>3</sup> бетону. У випадку застосування активних мінеральних добавок розрахунок водоцементного відношення має дещо видозмінений вигляд:

$$В/Ц_{\text{екв}} = В / (Ц + k_1 \times Z + k_2 \times NC + k_3 \times SX),$$

де,  $В/Ц_{\text{екв}}$  - еквівалентне водоцементне відношення;

$Ц$  - кількість цементу на 1 м<sup>3</sup> бетону;

$Z$  - кількість золи на 1 м<sup>3</sup> бетону;

$NC$  - кількість активної мінеральної добавки на основі метаксаоліну;

$SX$  - кількість активної мінеральної добавки на основі мікрокремнезему;

$k_1$ ;  $k_2$ ;  $k_3$  - коефіцієнти, що характеризують пуцоланову активність мінеральних добавок, відповідно золи, метаксаоліну та мікрокремнезему.

Стандартні значення цих коефіцієнтів, встановлені в європейських нормах, є наступними:

$$k_1 = 0,4; k_2 = 1; k_3 = 1;$$



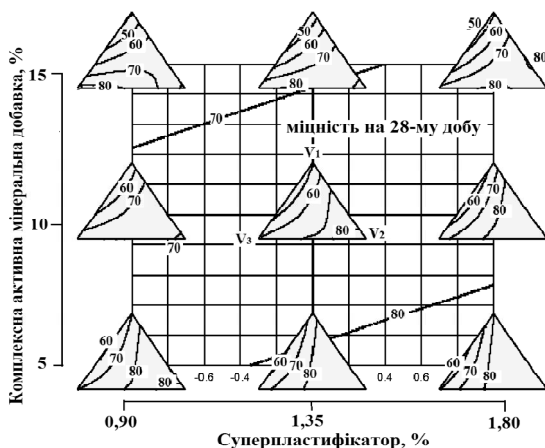


Рис. 3 Діаграма зміни міцності бетону після 28-ми діб твердіння

Однак, як показує досвід, їх справжнє значення відрізняється від стандартного і залежить від якості активних мінеральних добавок.. Використовуючи дані, наведені у таблиці 3, можна отримати наступні значення  $V/D_{\text{скв}}$  та міцності на 28 добу (таблиця 5):

Таблиця 5

Розрахункові дані значень міцності та  $V/D_{\text{скв}}$

$V/D_{\text{скв}}$ (1)	Міцність 28 д (2)	$V/D_{\text{скв}}$ (1)	Міцність 28 д (2)
0,35	66,30	0,44	52,19
0,39	53,60	0,39	55,15
0,40	64,40	0,38	67,10
0,39	62,50	0,35	78,10
0,41	58,75	0,40	51,90
0,36	76,20	0,39	63,60
0,38	57,70	0,38	55,20
0,40	55,40	0,39	60,80
0,36	72,10	0,39	62,70

При цьому значення коефіцієнтів  $k_1$ ;  $k_2$ ;  $k_3$  підбиралися таким чином, щоб отримати максимально тісний статистичний зв'язок між стовбцями (1) та (2) (таблиця5), який характеризується якомога вищим коефіцієнтом детермінації  $R^2$ . В результаті проведених розрахунків з'ясовано, що при використанні даних мінеральних добавок їхні коефіцієнти пуцоланової активності мають наступні значення :  $k_1 = 0,4$ ;  $k_2 = 1,4$ ;  $k_3 = 1,2$ . Графічна інтерпретація рівняння регресії представлена на рис.4.

З урахуванням цих даних можна відмітити, що найбільш високою пуцолановою активністю відрізняється добавка метаксаоліну Centrlit NC.

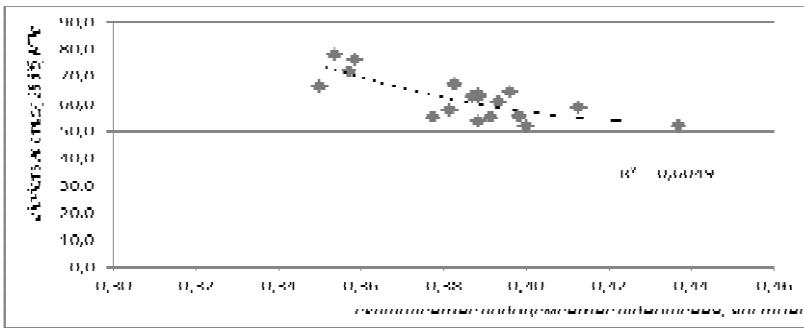


Рис.4. Графічна інтерпретація рівняння регресії

**Висновок:** Таким чином, аналіз і порівняння життєздатності бетонних сумішей і міцності бетонів із різним складом комплексної мінеральної добавки, дозволяють запропонувати в якості раціонального склад КАМД, що містить (60-70)% золи виносення і (40-30)% метаксаоліну. Отриманий результат пояснюється тим, що зола виносення і метаксаолін порівняно з мікрокремнеземом характеризуються меншою водо потребою, а також особливостями процесів структуроутворення при взаємодії алюмосилікатної складової комплексної добавки розглянутого складу з новоутвореннями портландцементу.

1. ДСТУ Б В.2.7-176:2008 (EN 206-1:2000, NEQ) Будівельні матеріали. Суміші бетонні та бетон. Загальні технічні умови. 2. Шейнич Л.А., Попруга П.В. Высокопрочные бетоны для монолитного домостроения, Міжвідомчий науково-технічний збірник "Будівельні конструкції", вип.№63, 2005.- с.95-99. 3. Пушкарьова К.К. Гончар О.А.,Павлюк В.В. Ефективність модифікації золонановнених композиційних цементів пластифікуючими добавками різного механізму дії /Производство и применение композиционных материалов строительной химии, IV Межд.научно-техн.-конф.,К.: 2007. - с. 63-68. 4. Пушкарьова К.К. Гончар О.А., Павлюк В.В., Павлюк І. М. Композиційні цементи на основі золюцементносульфатних сумішей, модифікованих добавкою метаксаоліну Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, Одеса, МПП "Евен", 2004.- с. 238-243. 5. Дворкін Л. Й., Лушнікова Н.В., Рунова Р.Ф., Троян В. В. Метаксаолін в будівельних розчинах і бетонах - К.: Вид-во КНУБА, 2007. - 216 с. 6. ДСТУ Б В.2.7-46:2008 Будівельні матеріали. Цементи загально-будівельного призначення. Технічні умови. 7. ДСТУ Б В.2.7-32-95 Будівельні матеріали. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови. 8. ДСТУ Б В.2.7-75-98 Будівельні матеріали. Щебінь і гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Технічні умови. 9. ДСТУ Б В.2.7-205:2009 Будівельні матеріали. Золи-виносу теплових електростанцій для бетонів. Технічні умови. 10. Методические указания по моделированию систем «смеси, технология, свойства» / В.А.Вознесенский, Т.В.Ляшенко, В.В.Абакумов, А.Абдыкалыков, Одеса, ОИСИ, 1985. - 64с. 11. Коваль С.В., Ляшенко Т.В. Экспериментально-статистическое моделирование и оптимизация многокомпонентных рецептурно-технологических систем, Киев: Знание, 1990. –1990. - 16 с.