

**РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ МАТЕРІАЛИ ТА НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ
ВИГОТОВЛЕННЯ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ**

УДК 666.97:691.32

**ВЛАСТИВОСТІ НЕАВТОКЛАВНОГО ПІНОБЕТОНУ З
ВИКОРИСТАННЯМ КОМПОЗИЦІЙНОГО В'ЯЖУЧОГО**

**СВОЙСТВА НЕАВТОКЛАВНОГО ПЕНОБЕТОНА С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПОЗИЦИОННОГО ВЯЖУЩЕГО**

**THE PROPERTIES OF NON-AUTOCLAVED FOAM CONCRETE WITH
USE OF A COMPOSITE BINDER**

**Бордюженко О.М., к.т.н., доцент, Дворкін Л.Й., д.т.н., професор,
Борейчук Є.О., магістр (Національний університет водного господарства та
природокористування, м. Рівне)**

**Бордюженко О.М., к.т.н., доцент, Дворкин Л.И., д.т.н., профессор,
Борейчук Е.А., магистр (Национальный университет водного хозяйства и
природопользования, г. Ровно)**

**Bordyuzhenko O.M., candidate of tech. sc., associate professor, Dvorkin L.Y.,
doctor of technical sciences, professor, Boreychuk Y.O., master (National
University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)**

**Розглянута та експериментально обґрунтована можливість
використання композиційного в'язучого, що включає в себе активну
мінеральну добавку та гіпс для виробництва пінобетонів неавтоклавного
твердіння. Визначено оптимальний склад такого в'язучого та його
вплив на властивості пінобетону.**

**Рассмотрена и экспериментально обоснована возможность
использования композиционного вяжущего, включающего в себя
активную минеральную добавку и гипс для производства пенобетон
неавтоклавного твердения. Определены оптимальный состав такого
вяжущего и его влияние на свойства пенобетона.**

**The expediency of use of composite binder that includes an active mineral
additives and gypsum to produce non-autoclaved foam concrete curing is
considered and experimentally proved. The optimal composition of the
binder and its influence on the properties of foam concrete is defined.**

На сучасному етапі розвитку технології ніздрюватих бетонів неавтоклавного твердіння основною технологічною задачею є забезпечення необхідної середньої густини пінобетону при максимально можливій міцності.

Попри всі позитивні якості, неавтоклавні пінобетони характеризуються рядом недоліків, які не завжди вдається усунути, або хоча б послабити їх. Так, внаслідок обов'язкового використання значної кількості ПАР (піноутворювач) пінобетону притаманні: уповільнений (на 20...30%) ріст міцності; низька стабільність (стійкість) свіжозаформованої пінобетонної суміші, що не рідко завершується повним руйнуванням піномаси або просіданням верхнього шару залитого при формуванні виробу (до 10%); утворення на поверхні виробів або масивів легко відшаровуваної коринки, що утруднює подальше опорядження [1]. Крім того, уповільнене тужавлення сирцю приводить до зміни густини по висоті виробу, що сприяє розвитку деструктивних процесів в масиві пінобетону. Як наслідок дії зазначених факторів, – суттєвий недобір міцності виробів у марочному віці (в 1,5...2 рази від значень регламентованих ДСТУ Б В.2.7-137 [2] для певних густин).

Також однією з причини вказаних недоліків є використання в якості єдиного компонента в'язучого для пінобетону портландцементу, що має порівняно тривалі строки тужавлення та терміни набору міцності.

З огляду на вищезазначене, представляє певний інтерес дослідження композиційної суміші для приготування пінобетону, що містить в своєму складі портландцемент, активну мінеральну добавку та гіпс з метою стабілізації пінобетонної маси в ранні строки після формування. Ймовірність утворення еtringіту в результаті твердіння такої системи мінімальна внаслідок використання шлаку, який зв'язує надлишок $\text{Ca}(\text{OH})_2$ у тверднучій системі і забезпечує перехід трьохсульфатної форми гідросульфоалюмінату – в односульфатну [3].

Метою наших досліджень було дослідження впливу золи та доменного шлаку в композиції з гіпсом на основні властивості неавтоклавного пінобетону.

В дослідженнях використовували портландцемент М500 ІІ типу Здолбунівського цементного заводу; піноутворювач ПО-6К (ПАР – представник алкілароматичних сульфокислот), гіперпластифікатор поліакрилатного типу Дунамон SP3, гіпс будівельний Г-5, пісок кварцовий (Мк = 1,8). В якості активних мінеральних добавок використовувались зола Бурштинської ТЕС а також мелений доменний гранульований шлак із залишком на ситі №008 близько 3%.

Проводили дві серії експериментів. В одній в якості активної мінеральної добавки виступала зола ТЕС, в другій – мелений доменний гранульований

шлак. В обох випадках гіпс застосовувався з метою стабілізації структури свіжозаформованого пінобетону.

В табл. 1 наведені умови планування експерименту за планом типу B_2 (план експерименту для двох факторів на трьох рівнях). Вихідним параметром приймалась міцність пінобетону на стиск у віці 28 діб.

В якості факторів впливу були обрані співвідношення витрат компонентів: шлак/цемент (Ш/Ц) (X_1), гіпс в суміші шлак+цемент (Г/(Ш+Ц)) (X_2). Аналогічний план був складений для золи.

Таблиця 1

Умови планування експерименту

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
		-1	0	+1	
натуральний вид	кодований вид				
Ш/Ц або (З/Ц)	X_1	0	0,25	0,5	0,25
Г/(Ш+Ц) або Г/(З+Ц)	X_2	0	0,05	0,1	0,05

Дана матриця експериментально виконувалась на матеріалах, зазначених вище. Приготування пінобетонної суміші проводили за роздільною двохстадійною схемою [4]. Концентрація розчину піноутворювача – 2%, кратність піни – 15...16. В усіх випадках витрата піноутворювача складала 1,3 л/м³. Водопотребу суміші контролювали за розпливом її на приладі Сутгарда (розплив близько 160 мм). Витрата пластифікатора Dynamon SP-3 в усіх точках плану складала 0,75% від витрати цементу (3 л/м³ бетону).

Витрата цементу в усіх точках була стабілізована на рівні 400 кг/м³. Витрата піску коректувалася для кожної точки матриці з метою забезпечення марки пінобетону за густиною Д800. При цьому використовувалася залежність:

$$\rho_6 = 1,15Ц + П + Ш(З) + Г,$$

де ρ_6 – проектна густина пінобетону, кг/м³.

Результати експерименту та склади бетону наведені в табл. 2 та 3.

Після проведення обробки і статистичного аналізу експериментальних даних отримані математичні моделі міцності на стиск стандартних бетонних кубів після 28 діб нормального твердіння, у вигляді поліноміальних рівнянь регресії. На основі отриманих експериментально-статистичних моделей (табл. 4) побудовані графічні залежності (рис. 1-2).

Таблиця 2

Склади пінобетону та результати експерименту з використанням
меленого доменного шлаку

№ т. плану	Значення факторів в				Витрати компонентів, кг/м ³				Міцність при стиску R ₂₈ , МПа	В/Ц	В/Т
	кодованому вигляді		натуральному вигляді								
	x ₁	x ₂	Ш/Ц	Г/(Ш+Ц)	Ш	Г	П	В			
1	1	1	0,5	0,1	200	60	80	210	3,38	0,53	0,31
2	1	-1	0,5	0	200	0	140	215	3,12	0,54	0,29
3	-1	1	0	0,1	0	40	300	190	2,14	0,48	0,27
4	-1	-1	0	0	0	0	340	180	2,34	0,45	0,24
5	1	0	0,5	0,05	200	30	110	205	3,77	0,51	0,29
6	-1	0	0	0,05	0	20	320	200	2,47	0,50	0,28
7	0	1	0,3	0,1	100	50	190	220	2,34	0,55	0,32
8	0	-1	0,3	0	100	0	240	195	2,73	0,49	0,26
9	0	0	0,3	0,05	100	25	215	210	2,99	0,53	0,29
10	0	0	0,3	0,05	100	25	215	210	2,86	0,53	0,29
11	0	0	0,3	0,05	100	25	215	205	3,05	0,51	0,29

Таблиця 3

Склади пінобетону та результати експерименту з використанням
золи Бурштинської ТЕС

№ т. плану	Значення факторів в				Витрати компонентів, кг/м ³				Міцність при стиску R ₂₈ , МПа	В/Ц	В/Т
	кодованому вигляді		натуральному вигляді								
	x ₁	x ₂	З/Ц	Г/(З+Ц)	З	Г	П	В			
1	1	1	0,5	0,1	200	60	80	210	2,3	0,48	0,28
2	1	-1	0,5	0	200	0	140	215	2,1	0,66	0,36
3	-1	1	0	0,1	0	40	300	190	1,6	0,45	0,26
4	-1	-1	0	0	0	0	340	180	0,9	0,60	0,32
5	1	0	0,5	0,05	200	30	110	205	2,4	0,51	0,29
6	-1	0	0	0,05	0	20	320	200	1,6	0,55	0,31
7	0	1	0,3	0,1	100	50	190	220	1,9	0,49	0,28
8	0	-1	0,3	0	100	0	240	195	1,5	0,65	0,35
9	0	0	0,3	0,05	100	25	215	210	1,8	0,52	0,29
10	0	0	0,3	0,05	100	25	215	210	1,9	0,54	0,30
11	0	0	0,3	0,05	100	25	215	205	1,9	0,51	0,29

Умовні позначення: П – пісок; В – вода; З – зола; Г – гіпс; В/Ц – водо-цементе відношення; В/Г – водо-тверде відношення.

Таблиця 4
Експериментально-статистичні моделі міцності пінобетону з використанням шлаку та золи

Вихідні параметри	Статистичні моделі
Міцність при стиску у віці 28 днів при використанні шлаку	$R_{28}^{\text{ш}} = 2,96 + 0,55 \cdot x_1 - 0,05 \cdot x_2 + 0,18 \cdot x_1^2 - 0,40 \cdot x_2^2 + 0,11 \cdot x_1 \cdot x_2$
Міцність при стиску у віці 28 днів при використанні золи	$R_{28}^{\text{з}} = 1,89 + 0,45 \cdot x_1 + 0,22 \cdot x_2 + 0,08 \cdot x_1^2 - 0,22 \cdot x_2^2 - 0,13 \cdot x_1 \cdot x_2$

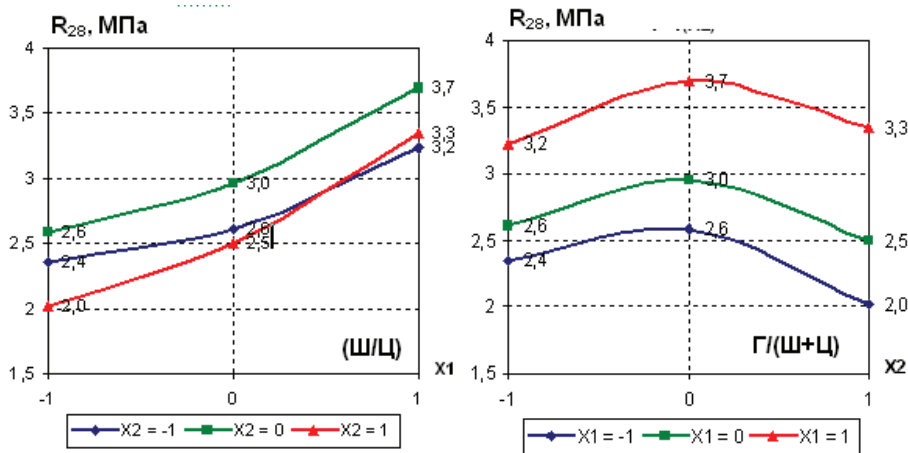


Рис. 1. Залежність міцності пінобетону у віці 28 днів від шлакоцементного відношення (X₁) та відношення гіпсу в суміші шлак + цемент (X₂)

Як показали дослідження, вплив добавок золи та шлаку на міцність пінобетону є достатньо подібним. Очевидно, що маючи значно більшу дисперсність у порівнянні з піском шлак та зола приводить до збільшення водопотреби пінобетонної суміші. Як наслідок – зростає В/Ц, що загалом є негативним наслідком. Однак, аналізуючи отримані результати, можна відмітити, що за витрат добавок в усьому діапазоні досліджуваних значень при помірному зростанні водопотреби, в той же час міцність – зростає (табл. 1.4-1.5). Це, очевидно пояснюється пуцолановою активністю даних компонентів. Крім того, більше зростання водопотреби компенсується введенням пластифікатора Дупамон SP-3.

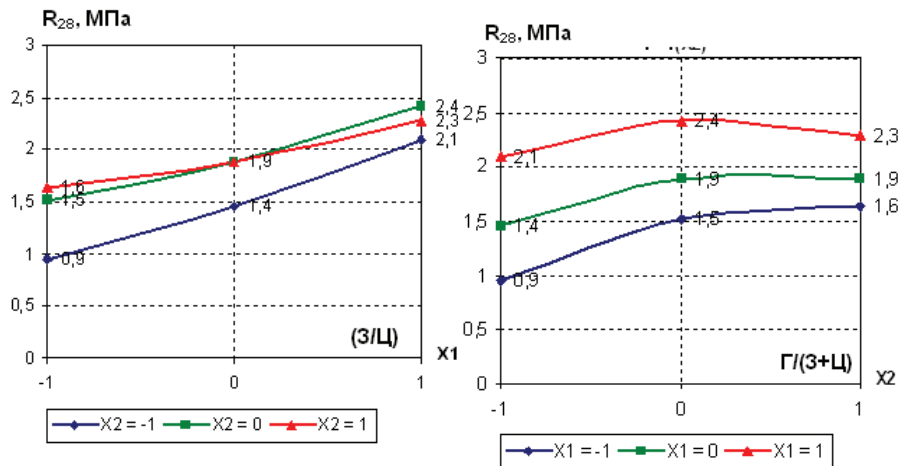


Рис. 2. Залежність міцності пінобетону у віці 28 діб від золоцементного відношення (X_1) та відношення гіпсу в суміші зола + цемент (X_2)

Як видно з одержаних математичних моделей міцності а також графічних залежностей (рис.1.2-1.3) міцність пінобетону в досліджуваному факторному просторі переважно залежить від відношення (Ш/Ц або З/Ц).

Для моделі зі шлаком лінійний ефект впливу фактора X_1 на порядок (в 10 разів) перевищує ефект фактора X_2 . Вплив останнього внаслідок проведеного статистичного аналізу моделі можна вважати не значимим.

Аналіз моделі із золою показує що фактор X_1 (З/Ц) за величиною і характером впливу практично тотожний. Однак абсолютні значення міцності при тих же самих значеннях фактора X_1 у випадку використання золи суттєво менші, ніж при використанні шлаку (в середньому на 50...60%). Очевидно в даному випадку впливають два фактори: 1) вища дисперсність золи у порівнянні зі шлаком, що позначається на водопотребі; 2) наявність у золі залишків палива, що приводить до зниження її активності.

Розглядаючи вплив другого фактора на міцність пінобетону (який практично характеризує вплив витрати гіпсу) варто зазначити, що фактор X_2 в першій моделі (із шлаком) є практично незначимим, а отже вплив гіпсу на міцність пінобетону у марочному віці (28 діб) є несуттєвим. Для моделі із золою лінійний ефект впливу фактора X_2 є більш значним ($b_2 = 0,22$), тобто при збільшенні фактора – міцність зростає. Крім того, можна відзначити певну зону оптимуму значення фактора ($X_2 = 0,4...0,6$), за якого досягається максимум вихідного параметру.

Для встановлення впливу гіпсу на значення ранньої міцності пінобетону (у віці 7 діб) проведено додаткові дослідження на складах пінобетону, що відповідають табл. 2.

Математична модель міцності у віці 7 діб а також графічна залежність її (рис. 3) від фактору X_2 ($G/(Ш+Ц)$) наведені нижче.

$$R_{7^m} = 0,73 + 0,13 \cdot x_1 + 0,41 \cdot x_2 + 0,23 \cdot x_1^2 - 0,05 \cdot x_2^2 + 0,07 \cdot x_1 \cdot x_2$$

Очевидно, що рання міцність пінобетону суттєво залежить від витрати гіпсу. Про це свідчить, зокрема, значний лінійний ефект впливу фактору X_2 , який майже в 3 рази перевищує величину впливу фактору X_1 , а також характер графічних залежностей (рис. 3-4).

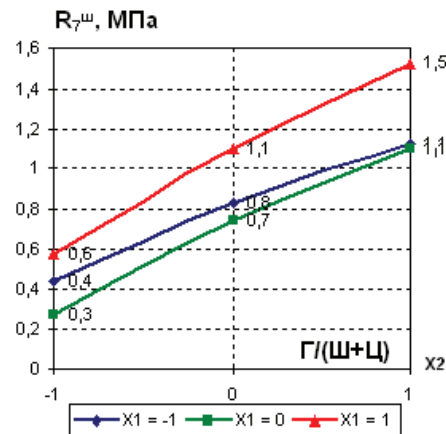


Рис. 3. Залежність міцності пінобетону у віці 7 діб від відношення гіпсу в суміші шлак + цемент (X_2)

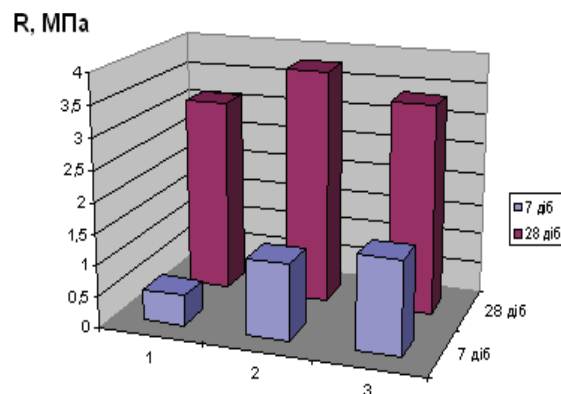


Рис. 4. Кінетика зміни міцності пінобетону залежно від вмісту гіпсу (1, 2, 3 – відповідні точки плану (табл. 2))

Оцінюючи ефект від введення гіпсу до складу пінобетонної суміші необхідно говорити не лише про фактичний вплив на марочну міцність пінобетону (який є досить слабким, особливо у випадку використання шлаку) а, головним чином, про позитивний вплив на стійкість пінобетонної маси і забезпечення високого значення ранньої міцності. Зразки із гіпсом характеризувались більшою в'язкістю маси, а прискорене тужавіння гіпсу сприяє більшій структуризації системи і протидії гістерезису (втрати води із плівок). Тому доцільність введення гіпсу до складу пінобетону необхідно розглядати саме з такої точки зору.

Підсумовуючи результати проведених досліджень, можна відмітити, що використання активних мінеральних добавок (шлак, зола) дозволяє при збереженні заданих значень міцності, скоротити витрату цементу (або досягти підвищення міцності при тій же витраті цементу).

Використання добавки шлаку дозволяє отримувати значно кращі результати, що пояснюється більшою його активністю та меншою водопотребою.

Добавка гіпсу, введена до складу пінобетонної суміші, сприяє суттєвому покращенню реологічних властивостей пінобетонної суміші, підвищує її стійкість, зменшує усадку і підвищує ранню структурну міцність.

Таким чином використанням гіпсо-цементного композиційного в'язучого з використанням добавки доменного шлаку дозволяє отримувати пінобетони неавтоклавної твердіння з покращеними характеристиками.

Оптимальне поєднання факторів (оптимальний склад) пінобетону був встановлений на основі проведеного ізопараметричного аналізу міцності. Максимальна міцність досягається при максимумі X_1 (Ш/Ц) і практично в усьому діапазоні зміни фактора X_2 (Г/(Ш+Ц)). За оптимальний пропонується такий склад ($X_1 = 1$; $X_2 = 0$), (кг/м³): цемент – 400; шлак – 200; гіпс – 30; пісок – 110; пластифікатор - 3. За таких витрат можна досягнути таких значень вихідних параметрів: $R_{ct} = 3,7$ МПа; $\rho_6 = 750...800$ кг/м³.

1. Дворкін Л.Й., Бордюженко О.М. Властивості неавтоклавної пінобетону з використанням гіперпластифікатора / Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – 36. наук. праць. Вип.17. – Рівне, вид-во НУВГП. – 2008, С. 13-20. **2.** ДСТУ Б В.2.7-137:2008. Будівельні матеріали. Блоки із ніздрюватого бетону стінові дрібні. Технічні умови. **3.** Рунова Р.Ф., Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Носовський Ю.Л. В'язучі речовини: Підручник. - К.: Основа, 2012. - 448 с. **4.** Дворкин Л.И., Бордюженко О.М. Эффективные неавтоклавные шлакосодержащие пенобетоны / Технологии бетонов. – 2010, №5-6, С. 68-71.