

УДК 666.973.6

## ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДУ ПІНОГІПСУ

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВА ПЕНОГИПСА

#### THE FOAMED GYPSUM COMPOSITION DESIGN

**Безусяк О.В. к.т.н., доц., Ковалик І.В. к.т.н., асистент, Дворкін Л.Й. д.т.н, проф.** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

**Безусяк А.В. к.т.н., доц., Ковалик И.В. к.т.н., ассистент, Дворкин Л.И. д.т.н., проф.** (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

**Bezusyak O. V. Ph.D., Assoc., Kovalyk I. V. Ph.D., Assistant Professor, Dvorkin L. Y. Doctor of Technical Sciences, Professor** (National University of Water Management and Nature, Rivne)

**Розглянуті основні властивості піногіпсу. Отримані теоретичні залежності та доведена їх адекватність. Викладена методика проектування складу піногіпсу. Приведено приклад розрахунку.**

**Рассмотрены основные свойства пеногипса. Полученные теоретические зависимости и доказана их адекватность. Изложенная методика проектирования состава пеногипса. Приведен пример расчета.**

**Basic characteristics of foamgypsum are considered. The theoretical dependencies are obtained and their adequacy was proved. The methodology of the foamgypsum composition is proposed. The example of the calculation is proposed.**

#### **Ключові слова:**

Піногіпс, гіпсове в'язуче, кратність піни, розрахунок складу.

Пеногипс, гипсовое вяжущее, кратность пены, расчет состава.

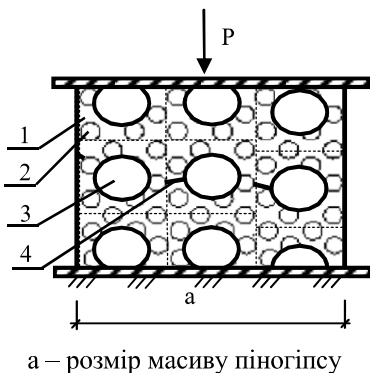
Foamed gypsum, gypsum binder, foam multiplicity, composition calculation

**Піногіпс** відноситься до ефективних будівельних матеріалів. Він має малу густину, низьку теплопровідність та високу вогнестійкість. Властивості піногіпсу залежать від якісних та кількісних показників його складових матеріалів і добавок, а також їх співвідношень. Зазвичай, проектування

складу піногіпсу виконується шляхом достатньо трудомісткого експериментального підбору.

Для розробки розрахунково-експериментального методу проектування складу піногіпсу авторами були проведені необхідні теоретичні та експериментальні дослідження [1].

В якості розрахункової схеми (рис. 1) розглядався масив, який включає гіпсовий камінь і макропори утворені від піни. Гіпсовий камінь в свою чергу додатково включає мікропори, утворені від надлишкової води.



**Рис. 1.** Розрахункова схема масиву піногіпсу:

- 1 – тверда фаза гіпсового каменю;
- 2 – мікропора в гіпсовому камені, від надлишкової води;
- 3 – макропора від піни;
- 4 – можлива поверхня руйнування масиву піногіпсу

Міцність масиву піногіпсу пропорційна мінімальній активній (умовно безпористій) площі поперечного перерізу твердої фази гіпсового каменю:

$$R_{\text{шт}} = \frac{P}{F} = \frac{R_{\text{т.ф}} \cdot F_{\text{т.ф}}}{F} = \frac{R_{\text{т.ф}} \cdot (F - F_{\text{пор}})}{F}, \quad (1)$$

де  $P$  – несуча здатність масиву піногіпсу, МН;  $F$  – площа поперечного перерізу масиву піногіпсу,  $\text{м}^2$ ;  $R_{\text{т.ф}}$  – міцність твердої фази гіпсового каменю, МПа;  $F_{\text{т.ф}}$  – мінімальна активна площа поперечного перерізу твердої фази гіпсового каменю в масиві піногіпсу,  $\text{м}^2$ ;  $F_{\text{пор}}$  – сумарна площа мікро- і макропор у поперечному перерізі масиву піногіпсу.

Виражаючи площу мікропор через пористість гіпсового каменю, утворену від надлишкової води  $\Pi_{\text{г.к}}$ , площу макропор через пористість піногіпсу, утворену від піни  $\Pi_{\text{пг}}$  рівняння (1) приймає вид [2]:

$$R_{\text{шт}} = R_{\text{т.ф}} \left( 1 - A_{\text{г.к}} \left( \Pi_{\text{г.к}} \right)^{2/3} \right) \cdot \left( 1 - A_{\text{пг}} \left( \Pi_{\text{пг}} \right)^{2/3} \right), \quad (2)$$

де  $A_{\text{г.к}}$  – коефіцієнт, що враховує особливості порового простору гіпсового каменю (рівномірність розподілу пор, їх розміри, форма та ін.) при стиску;  $A_{\text{пг}}$  – коефіцієнт, що враховує особливості порового простору піногіпсу.

Міцність піногіпсу також можна виразити через відношення густин вихідних фаз:

$$R_{\text{пр}} = R_{\text{т.ф}} \left( 1 - A_{\text{г.к}} \left( 1 - \frac{\rho_{\text{г.к}}}{\rho_0} \right)^{2/3} \right) \cdot \left( 1 - A_{\text{пр}} \left( 1 - \frac{\rho_{\text{пр}}}{\rho_{\text{г.к}}} \right)^{2/3} \right), \quad (3)$$

де  $\rho_{\text{г.к}}$  – міцність гіпсового каменю, г/см<sup>3</sup>;  $\rho_0$  – густина твердої фази гіпсового каменю,  $\rho_0 \approx 2,3$  г/см<sup>3</sup> [3];  $\rho_{\text{пр}}$  – густина піногіпсу, г/см<sup>3</sup>.

Розрахункові параметри, які необхідні при використанні формули (3), наведені в табл. 1.

У відповідності з отриманими експериментальними даними при використанні будівельного гіпсу марок Г-2...10 і синтетичного піноутворювача на основі високомолекулярного олефісульфоната – Hostapur OSB,  $A_{\text{г.к}} \approx A_{\text{пр}} \approx 1,27$ . Піногіпс отримували методом сухої мінералізації піни [4].

Згідно рівняння (3) побудовано графіки залежності міцності піногіпсу на стиск для різних густин при використанні гіпсового в'язучого з міцністю  $R_a = 2 \dots 10$  МПа. На рис. 2, 3 в якості прикладів, наведені графіки залежності міцності піногіпсу різної густини від В/Г та Q/Г при використанні гіпсового в'язучого з міцністю  $R_a = 6$  МПа.

Таблиця 1

Розрахункові параметри для визначення міцності піногіпсу

Показники	Од. вим.	Значення
Міцність твердої фази гіпсового каменю	МПа	$R_{\text{т.ф}} = R_a A_R A_{\text{ПАР}}$
Густина гіпсового каменю	г/см <sup>3</sup>	$\rho_{\text{г.к}} = A_x / \left( \rho_{\text{г.в}} + B/\Gamma \right)$
Густина піногіпсу	кг/м <sup>3</sup>	$\rho_{\text{пр}} = m_{\text{пр}} / V_{\text{пр}}$
Маса піногіпсу	кг	$m_{\text{пр}} = \Gamma \left( A_x + Q / \Gamma \right)$
Об'єм піногіпсу (піногіпсової суміші)	м <sup>3</sup>	$V_{\text{пр}} = \Gamma \left( 1/\rho_{\text{г.в}} + B/\Gamma + Q/\Gamma + 1000V_{\text{пор}}/\Gamma \right) / 1000$
Об'єм пор в піногіпсі	м <sup>3</sup>	$V_{\text{пор}} = 1675 m_p / m_{\text{p(г.с)}} \sigma_{\text{г.с}} V_{\text{p(г.с)}} C_{\text{г.с}}$
Маса розчину піни	кг	$m_p = \Gamma \left( B/\Gamma + Q/\Gamma \right)$
Маса розчину піногіпсової суміші	кг	$m_{\text{p(г.с)}} = \Gamma \left( B/\Gamma + Q/\Gamma \right)$

Поверхневий натяг води в піногіпсовій суміші	H/м	$\sigma_{\text{п.г.с}} = (72,8 - 3,96m_p / m_{\text{п.г.с}}) \times \ln(1 + 3,25^{14} C_{\text{п.г.с}}) / 1000$
Об'єм розчину піногіпсової суміші	м <sup>3</sup>	$V_{\text{п.г.с}} = \Gamma \left( \rho_{\text{г.в}} + B/\Gamma + Q/\Gamma \right) / 1000$
Концентрація ПАР в піногіпсовій суміші	%	$C_{\text{п.г.с}} = 100 Q / \left( \rho_{\text{г.в}} + B/\Gamma + Q/\Gamma \right)$
Коефіцієнт $A_{\text{ПАР}}$ (для синтетичного піноутворювача)		$A_{\text{ПАР}} = 1 - 1,7 \cdot 10^3 Q/\Gamma + 8,4 \cdot 10^5 (Q/\Gamma)^2$

**Примітка:**  $R_a$  – міцність гіпсового в'язучого на стиск через 2 год, МПа при стандартному випробуванні;  $A_R$  – коефіцієнт, що враховує перехід від зразків призм  $40 \times 40 \times 160$  мм до зразків кубиків  $100 \times 100 \times 100$  мм після висушування,  $A_R \approx 8,1$ ;  $A_{\text{ПАР}}$  – коефіцієнт, що враховує зменшення міцності гіпсового каменю внаслідок впливу піноутворюючого ПАР;  $A_x$  – коефіцієнт, що враховує масу води, яка вступила в хімічну реакцію (залежить від особливостей гіпсового в'язучого і умов проходження реакції гідратації), визначається дослідним шляхом,  $A_x \approx 1,17$ ;  $\Gamma$  – маса гіпсового в'язучого, кг;  $Q$  – маса піноутворюючого ПАР на суху речовину, кг;  $B$  – витрата води, л.

Аналіз графіків на рис. 2, 3 показує, що максимальному значенню міцності для певної густини піногіпсу відповідають оптимальні значення  $B/\Gamma$  та  $Q/\Gamma$ . Порівнюючи графіки залежності міцності від  $B/\Gamma$  та від  $Q/\Gamma$ , слід відмітити, що міцність піногіпсу більш чутлива до зміни  $Q/\Gamma$  ніж  $B/\Gamma$ .

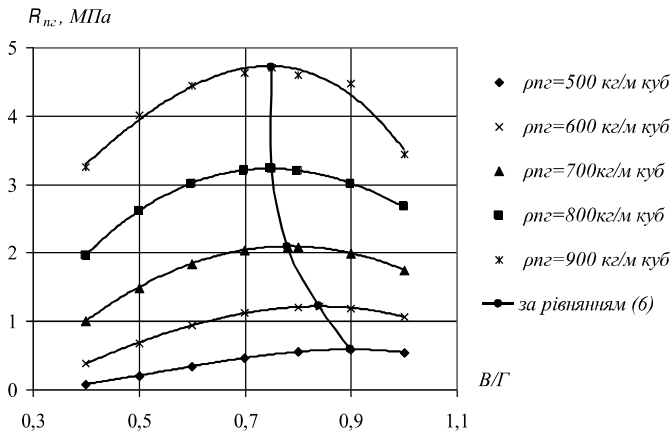


Рис. 2. Графіки залежності  $R_{\text{пг}}$  від  $B/\Gamma$  та  $\rho_{\text{пг}}$

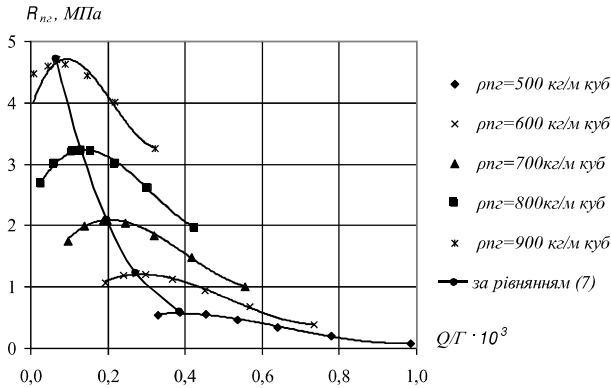


Рис. 3. Графіки залежності  $R_{пр}$  від  $Q/\Gamma$  та  $\rho_{пр}$

Оптимальні значення  $V/\Gamma$  та  $Q/\Gamma$  при використанні гіпсових в'язучих різної міцності в залежності від густини піногіпсу можна визначити із відповідних розрахункових залежностей:

$$R_a = 2 \text{ МПа: } V/\Gamma = 1,513 - 1,650 \cdot 10^{-3} \rho_{пр} - 0,929 \cdot 10^{-6} \rho_{пр}^2. \quad (4)$$

$$Q/\Gamma = 1,627 - 3,042 \cdot 10^{-3} \rho_{пр} + 1,459 \cdot 10^{-6} \rho_{пр}^2. \quad (5)$$

$$R_a = 6 \text{ МПа: } V/\Gamma = 1,581 - 1,890 \cdot 10^{-3} \rho_{пр} + 1,071 \cdot 10^{-6} \rho_{пр}^2. \quad (6)$$

$$Q/\Gamma = 1,119 - 1,851 \cdot 10^{-3} \rho_{пр} + 0,759 \cdot 10^{-6} \rho_{пр}^2. \quad (7)$$

$$R_a = 10 \text{ МПа: } V/\Gamma = 1,634 - 2,110 \cdot 10^{-3} \rho_{пр} - 1,214 \cdot 10^{-6} \rho_{пр}^2. \quad (8)$$

$$Q/\Gamma = 0,918 - 1,438 \cdot 10^{-3} \rho_{пр} + 0,550 \cdot 10^{-6} \rho_{пр}^2. \quad (9)$$

Виконанні дослідження і отримані формули (4) - (9) також дають можливість розрахувати оптимальні значення  $V/\Gamma$  та  $Q/\Gamma$ , які забезпечать максимальну міцність піногіпсу заданої густини при використанні гіпсових в'язучих різної міцності. Для отримання відповідних рівнянь  $V/\Gamma = f(\rho_{пр}; R_a)$  та  $Q/\Gamma = f(\rho_{пр}; R_a)$  був використаний метод математичного планування. У відповідності з умовами планування за тривірневим планом для  $k=2$  (табл. 2) визначенні розрахункові значення  $V/\Gamma$ ,  $Q/\Gamma$  та  $R_{пр}$  (табл. 3) і отримані рівняння регресії [4]:

$$V/\Gamma = 1,588 - 1,845 \cdot 10^{-3} \rho_{пр} - 1,5 \cdot 10^{-3} R_a + 1,075 \cdot 10^{-6} \rho_{пр}^2 - 7,5 \cdot 10^{-6} \rho_{пр} R_a; \quad (10)$$

$$Q/\Gamma = 1,411 - 2,328 \cdot 10^{-3} \rho_{пр} - 31,38 \cdot 10^{-3} R_a + 0,9 \cdot 10^{-6} \rho_{пр}^2 - 0,375 \cdot 10^{-3} R_a^2 + 41,25 \cdot 10^{-6} \rho_{пр} R_a; \quad (11)$$

$$R_{пр} = 5,022 - 0,01511 \rho_{пр} - 0,74638 R_a + 0,0107 \cdot 10^{-3} \rho_{пр}^2 +$$

$$+ 3,938 \cdot 10^{-3} R_a^2 + 1,5738 \cdot 10^{-3} \rho_{\text{пр}} R_a . \quad (12)$$

На основі отриманих рівнянь побудована номограма (рис. 4), яка дає можливість по заданих значеннях густини та міцності піногіпсу визначити необхідну марку гіпсового в'язучого, оптимальні значення В/Г і Q/Г та очікувану міцність піногіпсу.

Таблиця 2

Умови планування розрахунку

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
натуральний вид	кодований вид	-1	0	+1	
Густина піногіпсу $\rho_{\text{пр}}$ , кг/м <sup>3</sup>	X <sub>1</sub>	500	700	900	200
Міцність гіпсового в'язучого при стиску через 2 год. R <sub>a</sub> , МПа	X <sub>2</sub>	2	6	10	4

Таблиця 3

Матриця планування розрахунку та вихідні параметри

№ д. т.	Кодовані значення факторів		Натуральні значення факторів		Вихідні параметри		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	$\rho_{\text{пр}}$ , кг/м <sup>3</sup>	R <sub>a</sub> , МПа	$\frac{B}{\Gamma}$ , за моделями (4) – (6)	$\frac{Q}{\Gamma} \cdot 10^3$ , за моделями (7) – (9)	R <sub>пр</sub> , МПа, за рівнянням (3)
1	1	1	900	10	0,718	0,070	7,276
2	1	-1	900	2	0,781	0,071	1,349
3	-1	1	500	10	0,882	0,337	1,031
4	-1	-1	500	2	0,921	0,471	0,139
5	1	0	900	6	0,747	0,069	4,265
6	-1	0	500	6	0,903	0,384	0,542
7	0	1	700	10	0,752	0,182	3,459
8	0	-1	700	2	0,813	0,213	0,618
9	0	0	700	6	0,783	0,196	1,955
10	0	0	700	6	0,783	0,196	1,955
11	0	0	700	6	0,783	0,196	1,955

Наприклад по заданій густині  $\rho_{\text{пр}} = 750 \text{ кг/м}^3$  та міцності піногіпсу  $R_{\text{пр}} = 3,0 \text{ МПа}$  визначити оптимальні значення В/Г та Q/Г. По номограмі (рис.4) на графіках  $R_{\text{пр}} = f(\rho_{\text{пр}}; R_a)$  знаходимо точку перетину 1, що відповідає

заданій густині та міцності піногіпсу. Ця точка показує, що для забезпечення необхідної міцності, міцність гіпсового в'язучого повинна бути не менше 7,2МПа. Приймаємо найближчу марку гіпсового в'язучого Г-8 ( $R_a=8,0$  МПа), що відповідає точці 2. По точці 2 на графіках  $Q/\Gamma = f(R_{пр}; R_a)$  знаходимо точку перетину 3 з  $R_a = 8,0$  МПа. Ордината точки 3 відповідає шуканому значенню  $Q/\Gamma = 0,14 \cdot 10^{-3}$ . Далі, по точці 2 на графіках  $V/\Gamma = f(\rho_{пр}; R_a)$  знаходимо точку перетину 4 з  $R_a = 8,0$  МПа. Ордината точки 4 відповідає шуканому значенню  $V/\Gamma = 0,75$ . Ордината точки 2 також відповідає міцності піногіпсу при прийнятих  $V/\Gamma$ ,  $Q/\Gamma$ ,  $R_a$  і становить  $R_{пр} = 3,4$  МПа. Таким чином, при проектуванні оптимального складу піногіпсової суміші при заданих значеннях густини та міцності піногіпсу необхідно прийняти  $V/\Gamma=0,75$  та  $Q/\Gamma = 0,14 \cdot 10^{-3}$ .

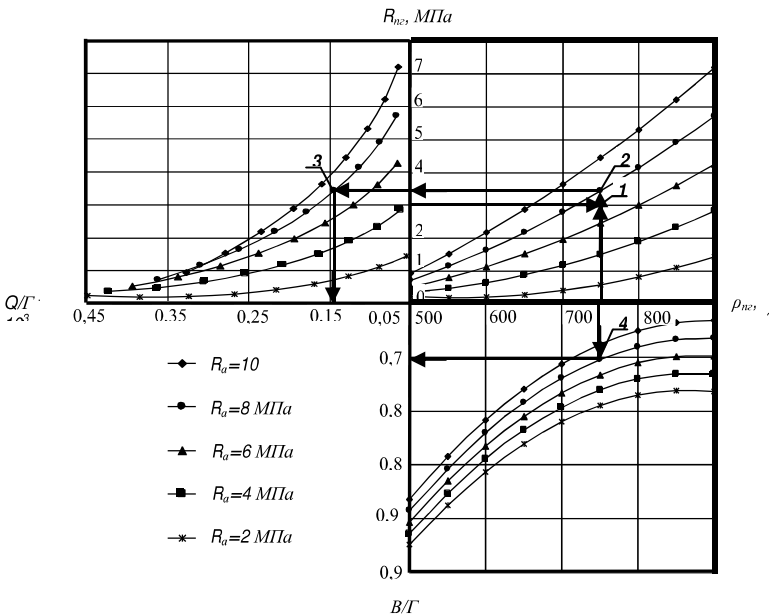


Рис. 4. Номограма визначення  $V/\Gamma$  та  $Q/\Gamma$  для проектування піногіпсу

Виконанні, експериментально-теоретичні дослідження дають можливість запропонувати розрахунково-експериментальну методику проектування складу піногіпсу при використанні гіпсових в'язучих різної міцності.

Задача проектування складу піногіпсу полягає у визначенні при заданих значеннях густини та міцності матеріалу, необхідної марки і маси гіпсового в'язучого, витрати води та синтетичного піноутворюючого ПАР на  $1\text{м}^3$ .

**Приклад розрахунку складу піногіпсу:**

Для виготовлення  $1 \text{ м}^3$  піногіпсу густиною  $\rho_{\text{пг}} = 750 \text{ кг/м}^3$  та міцністю на стиск  $R_{\text{пг}} = 3,0 \text{ МПа}$  необхідно розрахувати оптимальний склад піногіпсової суміші та визначити марку гіпсового в'язучого. При цьому слід врахувати, що виготовлення піногіпсової суміші виконується методом сухої мінералізації. Для її приготування використовується синтетичний піноутворювач Hostapur OSB на основі високомолекулярного олефісульфоната.

1. Визначаємо масу гіпсового в'язучого, яка забезпечить отримання  $V_{\text{пг}} = 1 \text{ м}^3$  піногіпсу:  $G = \rho_{\text{пг}} V_{\text{пг}} / A_x = 750 \cdot 1 / 1,17 = 641 \text{ кг}$ .

Значення коефіцієнта, який враховує масу води що вступила в хімічну реакцію приймаємо  $A_x \approx 1,17$ .

2. По заданій густині та міцності піногіпсу за допомогою номограми (рис.4) визначаємо  $R_a = 8,0 \text{ МПа}$ ,  $B/G = 0,75$ ,  $Q/G = 0,14 \cdot 10^{-3}$  та  $R_{\text{пг}} = 3,43 \text{ МПа}$ .

3. Знаходимо необхідну витрату води:  $B = B/G \cdot G = 0,75 \cdot 641 = 481 \text{ л}$ .

4. Розраховуємо необхідну масу піноутворювача (на суху речовину) для утворення розчину ПАР:  $Q = Q/G \cdot G = 0,14 \cdot 10^{-3} \cdot 641 = 0,089 \text{ кг}$ .

Отримані розрахункові значення складу піногіпсової суміші уточнюються експериментально. Експериментальна перевірка розрахунку складу піногіпсу підтвердила можливість отримання піногіпсу заданих проектних показників.

У випадках, коли за рахунок зміни міцності гіпсового в'язучого отримати піногіпс заданих проектних показників неможливо, необхідно розглядати можливість покращення властивостей піногіпсу за рахунок використання гіпсоцементнопуцоланових, композиційних, гіпсополімерних

У випадку коли, за рахунок зміни активності гіпсового в'язучого отримати піногіпс з заданими показниками неможливо, необхідно покращувати властивості піногіпсу за рахунок використання гіпсоцементнопуцоланових, композиційних, композиційно-гіпсополімерних в'язучих та інших технологічних прийомів.

**Висновок:** на основі виконаних досліджень отримані розрахункові залежності для визначення оптимальних значень  $B/G$ ,  $Q/G$  і  $R_{\text{пг}}$  для піногіпсу різної густини та міцності гіпсових в'язучих. Побудована номограма, яка дає можливість по заданими показниками якості піногіпсу визначити необхідну марку гіпсового в'язучого й оптимальні значення  $B/G$ ,  $Q/G$  та  $R_{\text{пг}}$ .

1. Дворкін Л.Й. Розрахунок міцності піногіпсу на основі структурно-фізичної моделі/ Л.Й. Дворкін, О.В. Безусяк, І.В. Ковалик // Вісник НУВГП, Випуск 1(49). – Рівне, 2010. - С. 136-143. 2. Дворкин Л.И. Проектирование пены при получении поризованных материалов / Л.И. Дворкин, А.В. Безусяк, И.В. Ковальк // Популярное бетоноведение. 2010. -№4 (35). - С.40-46. - ISSN 1995-462X. 3. Пащенко О. О. та ін. В'язучі матеріали: Підручник: Пер. з рос./О. О. Пащенко, В. П. Сербін, О. О. Старчевська. – К.: Вища шк., 1995. – 416 с. 4. Меркин А.П. Пенобетоны «сухой минерализации» для монолитного домостроения // Известия ВУЗов. Строительство, 1993. № 9. С. 56-58. 5. Рекомендации по применению методов математического планирования эксперимента в технологии бетона. М., НИИЖБ Госстроя СССР. 1982, с.103.