

БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ТА ВИРОБИ

УДК 666.973.6

DOI: 10.31649/2311-1429-2024-2-26-29

К. К. Сівак
М. С. Лемешев

ОПТИМІЗАЦІЯ СТРУКТУРИ СИЛІКАТНОГО ПОРИСТОГО БЕТОНУ

Вінницький національний технічний університет

Сучасна будівельна індустрія активно використовує силікатний ніздрюватий бетон, або газосилікат, завдяки його численним перевагам, таким як висока міцність, легкість, вогнестійкість та екологічна чистота. Однак, існує проблема досягнення стабільної якості цього матеріалу, особливо при виробництві зниженої щільності.

Аналіз сучасних досліджень демонструє потребу в удосконаленні технологій виробництва автоклавних пористих бетонів, оскільки зростають вимоги до енергозбереження та оптимізації сировинних ресурсів. Важливими є чинники, що впливають на структуру газосилікату, зокрема, співвідношення компонентів і умови перемішування.

У статті розроблено методику комп'ютерного моделювання, що дозволяє аналізувати вплив різних чинників на мікро- та макроструктуру газосилікату. Досліджено вплив в'язучих матеріалів та температурних режимів. Отримані математичні моделі сприяють оптимізації реологічних і температурних характеристик суміші.

Експериментальні дані підтверджують можливість отримання високих показників міцності на стиск за оптимальних дозувань компонентів, таких як портландцемент і напіводний гіпс. Отримані результати відкривають нові перспективи для подальших досліджень у сфері енергозберігаючих технологій у будівництві.

Побудовано поверхні відгуку цільових функцій – діаметра розпливу суміші по Суттарду та температури суміші під час заливки для пористого бетону марки D500 в площинах параметрів впливу, що дозволяє наглядно проілюструвати вказані залежності.

Ключові слова: газосилікат, автоклавні пористі бетони, мікро- і макроструктура, оптимізація, енергозбереження

Вступ

Сучасна будівельна індустрія активно використовує силікатний ніздрюватий бетон, відомий як газосилікат, як один із провідних матеріалів для стінових конструкцій. Це пояснюється його численними перевагами: висока міцність, вогнестійкість, низька теплопровідність. Тому пористий силікатний бетон широко використовується у всьому світі завдяки цим унікальним властивостям.

Сьогодні силікатний ніздрюватий бетон (газосилікат) займає провідні позиції серед стінових будівельних матеріалів. Це цілком пояснюється численними перевагами даного матеріалу: він негорючий, легкий і міцний, екологічно чистий та відносно дешевий будівельний матеріал. Тому технологія виготовлення пористого силікатного бетону постійно удосконалюється.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В даний час активізувалися роботи з питань фізико-механічних показників автоклавних пористих бетонів нового покоління [1-4]. Посилення концепції енергозбереження щодо огорожувальних конструкцій сформувало необхідність більш ефективного використання сировинних та енергетичних ресурсів. Це можливо за рахунок максимального зниження щільності і теплопровідності стінових конструкцій при заданих показниках їх якості [5-8]. Однак сучасний рівень технології не дозволяє стабільно отримувати пористий бетон досконалої структури, що особливо притаманно виробам зниженої щільності. Створення досконалих структур можливе лише з урахуванням ефективного управління процесами структуроутворення пористого бетону.

Постановка завдання

Для отримання газосилікату зниженої середньої щільності з необхідним рівнем фізико-механічних властивостей необхідно створити умови для формування якомога менш дефектної комірчастої структури і більш міцної міжпорової перегородки [9-12]. Оскільки одні й ті самі чинники одночасно впливають як на властивості мікро- та макроструктури пористого бетону, вирішення такого складного завдання виявляється можливим лише з урахуванням ефективного управління процесами структуроутворення на всіх рівнях виготовлення будівельних виробів комірчастої структури.

Виклад основного матеріалу

Методика комп'ютерного моделювання передбачає, передусім, ретельний аналіз чинників, які впливають на перебіг структуроутворення бетону. При розгляді цього завдання враховувалося, що якість мікроструктури визначається, головним чином, складом в'язучого, тонкістю його помелу, В/Ц-відношенням та режимом автоклавної обробки [13-14]. На процеси макроструктуроутворення

пористого бетону впливає досить широкий ряд факторів: дозування та активність газоутворювача, В/Ц-відношення, дозування сировинних компонентів, їх питомі поверхні та температури, режим перемішування та характеристики змішувача. При цьому дуже важливо забезпечити узгодженість процесів газоутворення та наростання в'язко-пластичних властивостей суміші.

В методиці розробленій авторами у роботі [15], встановлено однозначний зв'язок між проектованою середньою щільністю газосилікату, дозуванням вапна, кремнеземистого компонента, їх питомими поверхнями, дозуванням портландцементу, його хімічним і мінералогічним складом, активністю вапна і дозуванням газоутворювача з позицій що дозволяє замість перерахованих незалежних керуючих факторів використовувати лише один. Наприклад, приймаючи дозування портландцементу за незалежний керуючий фактор, для газосилікату будь-якої проектної марки за густиною визначаються оптимальні значення інших перерахованих факторів.

В результаті проведених експериментів, отримані математичні моделі, що дозволяють оптимізувати початкові реологічні (D) та температурні (T) характеристики суміші. Для пористого бетону марки D500, вони мають вигляд:

$$D = -162.2530 + 386.1257 \times B/C + 3.8535 \times C - 4.6099 \times G + 1.0381 \times T_w - 4.3938 \times B/C \times C + 8.4625 \times B/C \times G + 0.0418 \times C \times G - 0.0355 \times C \times T_w - 0.0963 \times G \times T_w - 185.9561 \times B/C^2 \\ T = 326.7609 - 713.1882 \times B/C - 7.4005 \times C + 2.5122 \times G + 0.5448 \times T_w + 9.4063 \times B/C \times C - 4.3125 \times B/C \times G + 420.85193 \times B/C^2 + 0.02093 \times C^2 + 0.04774 \times G^2,$$

де: D - діаметр розпливу суміші по Суттарду, см;

B/C - водоцементне відношення;

C - дозування портландцементу, % за масою у складі сухих компонентів;

G - дозування гіпсу, % за масою у складі сухих компонентів;

T_w - температура води замішування, °C;

T - температура суміші, °C.

Перевірка чинників на значимість здійснювалася за критерієм Стюдента. Адекватність моделей підтверджено їх перевіркою за критерієм Фішера.

На рис. 1 та 2 показано поверхні відгуку цільових функцій – діаметра розпливу суміші по Суттарду D та температури суміші під час заливки T, відповідно, для пористого бетону марки D500 в площинах параметрів впливу, що дозволяє наглядно проілюструвати вказані залежності.

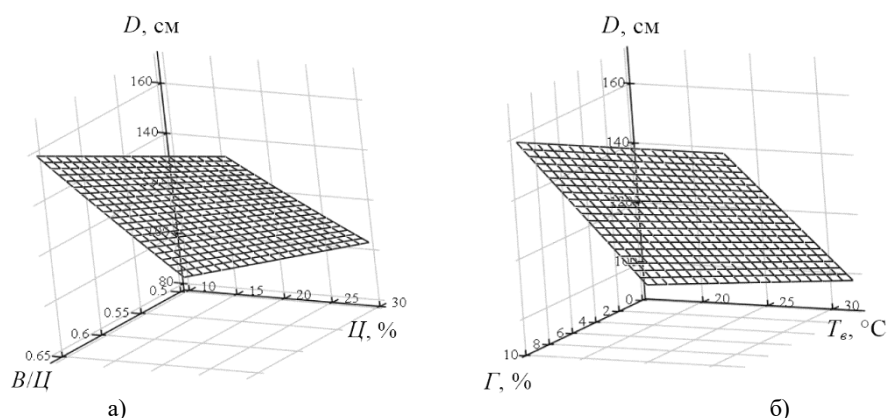


Рисунок 1 – Поверхні відгуку цільової функції – діаметра розпливу суміші по Суттарду D для пористого бетону марки D500 в площинах параметрів впливу: а) $D = f(B/C, C)$; б) $D = f(G, T_w)$

Слід зауважити, що залежності отримані для фіксованої температури сировинних компонентів. Якщо температура сировинних компонентів перед перемішуванням інша, то необхідно моделі доповнити рівнянням енергетичного балансу системи компонентів.

Насправді така система має інерційність з особливостями теплообмінних процесів. Однак тривалість вирівнювання температур досить мала порівняно з тривалістю перемішування і спучування формувальної суміші, а в силу того, що компоненти тонко розмелені, частинки мають велику питому поверхню і піддаються інтенсивному перемішуванню, швидкість теплообмінних процесів системи значно збільшується. Тому в роботі для спрощення розрахунків було зроблено припущення, що температури компонентів при їх перемішуванні миттєво вирівнюються, і цей ідеалізований момент часу названий умовним нульовим моментом.

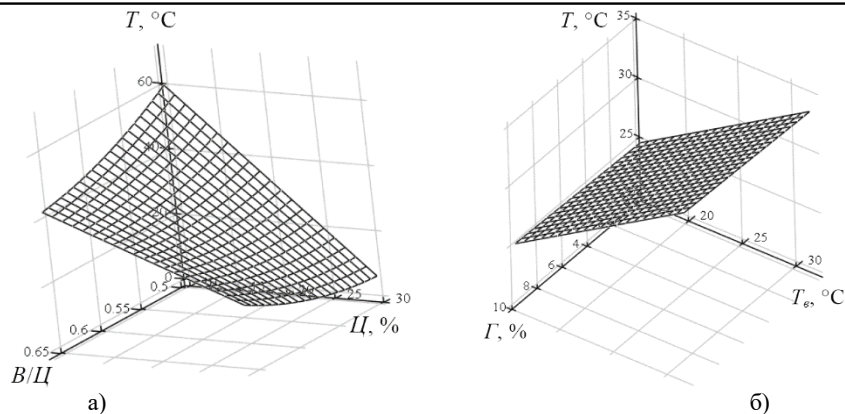


Рисунок 2 – Поверхні відгуку цільової функції – температури суміші під час заливки T для пористого бетону марки D500 в площинах параметрів впливу: а) $D = f(B/C, C)$; в) $D = f(G, T_0)$

Рівняння енергетичного стану системи компонентів газосилікатної суміші при перемішуванні в умовний нульовий момент часу для замкнутої системи без теплообміну із зовнішнім середовищем та без урахування тепловиділення від хімічних реакцій має вигляд:

$$C_B \times m_B \times (T_{CM} - T_B) + C_I \times m_I \times (T_{CM} - T_I) + C_{II} \times m_{II} \times (T_{CM} - T_{II}) + C_{II} \times m_{II} \times (T_{CM} - T_{II}) + C_D \times m_D \times (T_{CM} - T_D) + C_A \times m_A \times (T_{CM} - T_A) + C_C \times m_C \times (T_{CM} - T_C) = 0$$

Де: $C_B, C_I, C_{II}, C_{II}, C_D, C_A$ і C_C – питомі теплоємності відповідно води, вапна, піску, цементу, гіпсу, алюмінієвої пудри та змішувача, кДж/(кг·К);

$T_{CM}, T_B, T_I, T_{II}, T_{II}, T_D, T_A, T_C$ – температури в умовний нульовий момент часу при перемішуванні відповідно силікатної суміші, води, вапна, піску, цементу, гіпсу, алюмінієвої пудри та змішувача, °С;

$m_B, m_I, m_{II}, m_{II}, m_D, m_A, m_C$ – маси відповідно води, вапна, піску, цементу, гіпсу, алюмінієвої пудри та змішувача, кг.

Рівняння дозволяє розраховувати температуру силікатної суміші при відомих температурах всіх сировинних компонентів, включивши їх як керуючі фактори в загальну структуру мультипараметричної моделі, що розробляється.

На основі рівнянь та функціональних залежностей, представлених у методиці оптимізації кількості цементуючої речовини [16], отримані системи рівнянь, які описують вплив керуючих параметрів на температурний та реологічний стан силікатної суміші в момент її заливання у форму. Ці рівняння мають такий вигляд :

$$\begin{aligned} T_{CM} &= F1(Y/ T, C, G, T_0, T_i, T_n, T_{II}, T_2, T_c, M_c, C_c, A_i, \text{Косн.ц}), \\ D &= F2(Y/ T, C, G, T_0, T_{CM}, A_i, \text{Косн.ц}), \\ T &= F3(Y/ T, C, G, T_0, T_{CM}, A_i, \text{Косн.ц}), \end{aligned}$$

де: M_c і C_c – величина маси змішувача по відношенню до маси компонентів, % і питома теплоємність змішувача відповідно, кДж/кг К;

A_i – активність вапна, %;

Косн.ц – коефіцієнт основності цементу.

Отримано результати, що описують вплив дозувань портландцементу та напівводного гіпсу на процес формування комірчастої структури. Рівні варіювання факторів наведені в таблиці 1. Як вихідну характеристику розглядалася міцність на стиск бетону. Для цього з одного відформованого масиву вирізалися 6 зразків-кубів зі стороною 7 см, які піддавалися автоклавній обробці при тиску 0.8 МПа за режимом 1.5 год (підйом тиску) + 8 год (витримка) + охолодження.

Таблиця 1

Рівні варіювання факторів для отримання результатів процесу формування комірчастої структури

Найменування фактора	Марка за щільністю	Рівні факторів				
		-α	-1	0	+1	+α
Дозування портландцементу, %	D500	10	12.9	20	27.1	30
	D400	10	12.9	20	27.1	30
	D300	10	12.9	20	27.1	30
	D100	12.2	13	15	17	17.8
Дозування гіпсу, %	D500	0	1.5	5	8.5	10
	D400	0	1.5	5	8.5	10
	D300	0	1.5	5	8.5	10
	D100	1.8	2	2.5	3	3.2

Отримано поліноміальні моделі впливу добавок портландцементу та напівводного гіпсу на характеристики міцності пористого бетону у вигляді коефіцієнта конструктивної якості (ККЯ), рівного відношенню міцності на стиск зразків до квадрата їх середньої щільності:

для пористого бетону марки D500:

$$KKY_{D500} = 0.000008031 + 1.9902 \times 10^{-7} \times C + 0.000001095 \times G + 1.1097 \cdot 10^{-8} C G - 6.5055 \cdot 10^{-9} C^2 - 1.0320 \cdot 10^{-7} G^2$$

для пористого бетону марки D400:

$$KKY_{D400} = 0.000002120 + 4.9058 \times 10^{-7} \times C + 0.000002276 \times G - 4.2487 \cdot 10^{-8} C G - 5.3009 \cdot 10^{-9} C^2 - 8.6384 \cdot 10^{-8} \times G^2$$

для пористого бетону марки D300:

$$KKY_{D300} = -0.000005983 + 0.000001112 \times C + 0.000001794 G - 4.0589 \cdot 10^{-8} C G - 1.8742 \cdot 10^{-8} C^2 - 6.6770 \cdot 10^{-8} G^2$$

для пористого бетону марки D100:

$$KKY_{D100} = 0.00002264 - 9.4416 \times 10^{-7} \times C + 0.00000781 G + 2.275 \cdot 10^{-7} C G + 9.5 \cdot 10^{-9} C^2 + 7.62 \cdot 10^{-7} G^2$$

де: C - дозування портландцементу, % за масою у складі сухих компонентів;

G – дозування гіпсу, % за масою у складі сухих компонентів.

Аналіз залежностей дозволяє встановити оптимальні дозування гіпсу та портландцементу.

У таблиці 2 представлені значення міцності на стиск зразків-кубів що забезпечують їх оптимальне дозування та параметри сировинних компонентів.

Таблиця 2

Міцність на стиск зразків-кубів, оптимальне дозування компонентів та параметри сировинних компонентів (на 1 м³)

Марка за щільністю	Вапно мелене негашене з активністю 85.6%		Пісок мелений		Портланд цемент	Гіпс напівводний	Вода	Алюмі- нієва пудра	Міцність на стиск, МПа
	Питома поверхня, м ² /кг	Дозування, кг	Питома поверхня, м ² /кг	Дозування, кг	Дозування, кг	Дозування, кг	В/Ц	Дозування, кг	
D500	560	76.64	290	269.16	98.80	30.40	0.617	0.480	4.2
D400	560	102.88	310	201.13	38.00	38.00	0.762	0.541	3.5
D300	560	43.95	320	158.12	64.13	18.81	0.704	0.608	1.6
D100	560	24.33	340	56.42	12.35	1.90	0.844	0.759	0.2

Висновки

Таким чином, розробка та застосування мультипараметричної моделі дозволяє узгоджено провести оптимізацію на всіх рівнях формування структури пористого бетону. Особливо наочно це реалізується при отриманні ніздрюватого бетону марки D400 та D500, для яких середня міцність на стиск становить 3,5- 4,2 МПа відповідно, що відповідає класу за міцністю на стиск В 2,5-3. Побудовано поверхні відгуку цільових функцій – діаметра розпливу суміші по Суттарду та температури суміші під час заливки для пористого бетону марки D500 в площинах параметрів впливу, що дозволяє наглядно проілюструвати вказані залежності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- Glovyn, N., et al. Technical, agricultural and physical sciences as the main sciences of human development. International Science Group, 2024.
- Johnston, C. D. Cellular Concrete: Properties and the Use of Concrete, Volume 1. – CRC Press, 2018. – 480 pages.
- Hladyshev, D., et al. Technical and agricultural sciences in modern realities: problems, prospects and solutions. International Science Group, 2023.
- Jones, M. R., McCarthy, A. Preliminary Views on the Potential of Foamed Concrete as a Structural Material. – Magazine of Concrete Research, 2019. – Vol. 57, Issue 1, pp. 21-31.
- Kalafat, K., L. Vakhitova, and V. Drizhd. "Technical research and development." International Science Group. – Boston : Primedia eLaunch, 616 p. (2021).
- Boiko, T., et al. Theoretical foundations of engineering. Tasks and problems. Vol. 3. International Science Group, 2021.
- Sokolovskaya, O. "Scientific foundations of modern engineering/Sokolovskaya O., Ovsiannikova L. Stetsiuk V., etc–International Science Group." Boston: Primedia eLaunch 528 (2020).
- Lemeshev, M., et al. Applied, technical and agricultural sciences: introduction of the latest technologies into use. International Science Group, 2024.
- Kornylo, I., O. Gnyp, et al. "Scientific foundations in research in Engineering." (2022).
- Ramamurthy, K., Kunhanandan Nambiar, E. K., Indu Siva Ranjani, G. A Classification of Studies on Properties of Foamed Concrete. – Cement and Concrete Composites, Elsevier, 2018. – Vol. 31, Issue 6, pp. 388-396.
- Hladyshev, D., et al. Prospective directions of scientific research in engineering and agriculture. International Science Group, 2023.
- Beresjuk, O., et al. Theoretical and scientific foundations in research in Engineering. Vol. 1. International Science Group, 2022.

13. Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. Fourth Edition. – McGraw-Hill Education, 2014. – 704 p.
14. Demchyna, B., et al. Scientific foundations of solving engineering tasks and problems. Vol. 2. International Science Group, 2021.
15. Hnes, L., S. Kunytskyi, and S. Medvid. "Theoretical aspects of modern engineering." International Science Group: 356 p. (2020).
16. Бедарев, А.А. Моделирование структурных характеристик пористого бетона: подходы, методы, алгоритмы идентификации та аналізу макроструктури. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 176 с

Сівак Катерина Костянтинівна — аспірантка кафедри будівництва, міського господарства та архітектури. Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця. ORCID 0000-0002-5300-1707.

Лемешев Михайло Степанович — к.т.н., доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури. Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95. ORCID 0000-0002-6083-0378.

K. Sivak
M. Lemeshev

OPTIMIZATION OF THE STRUCTURE OF SILICATE POROUS CONCRETE

Vinnytsia National Technical University

The modern construction industry actively uses silicate aerated concrete, or gas concrete, due to its numerous advantages such as high strength, light weight, fire resistance, and ecological purity. However, there is a challenge in achieving consistent quality of this material, especially in the production of lower-density variants.

Analysis of current research highlights the need to improve the production technologies of autoclaved aerated concretes, as demands for energy efficiency and optimization of raw material resources are increasing. Key factors affecting the structure of gas concrete include the ratios of components and mixing conditions.

The article develops a computer modeling methodology that allows for the analysis of the influence of various factors on the micro- and macrostructure of gas concrete. The impact of binding materials and temperature regimes has been investigated. The resulting mathematical models contribute to the optimization of the rheological and thermal characteristics of the mixture.

Experimental data confirm the possibility of achieving high compressive strength indicators with optimal dosages of components such as Portland cement and semi-hydrated gypsum. The results open new perspectives for further research in the field of energy-saving technologies in construction.

The response surfaces of the target functions – the diameter of the mixture spread according to Suttard and the temperature of the mixture during pouring for cellular concrete grade D500 in the planes of the impact parameters – are constructed, which allows for a clear illustration of the indicated dependencies.

Key words: gas silicate autoclaved porous concrete, micro- and macrostructure, optimization, energy saving

Sivak Kateryna – Postgraduate student of the Department of Construction, Municipal Economy and Architecture. Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine. ORCID 0000-0002-5300-1707.

Lemeshev Mykhailo – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Construction, Municipal Economy and Architecture. Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, 95 Khmelnytske Highway. ORCID 0000-0002-6083-0378.