

МОДИФІКАЦІЯ СІРОБЕТОНУ МАГНЕТИТОМ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД РАДІАЦІЇ ТА ЗБЕРЕЖЕННЯ МІЦНОСТІ В УМОВАХ НИЗЬКОГО АТМОСФЕРНОГО ТИСКУ

У сучасному будівництві для екстремальних умов, таких як поверхня Марса (атмосферний тиск 610 Па, радіаційний фон 250 мЗв/рік) та високігірні регіони Землі, актуальним є подолання негативного впливу низького атмосферного тиску та радіації на структуру бетону. Сірковий бетон є перспективним матеріалом завдяки відсутності потреби у воді, що робить його ідеальним для умов із дефіцитом вологи, таких як Марс, де вода становить лише 0,03% атмосфери. Проте його деградація під дією радіації (втрата міцності на стиск до 2,7 МПа за рік) і теплових циклів (коливання температури від -140°C до +20°C на Марсі) потребує модифікацій для підвищення стійкості. Метою роботи є аналіз ефективності додавання магнетиту (Fe_3O_4) до сіркового бетону для підвищення його радіаційного захисту та збереження міцності в умовах низького атмосферного тиску, що має практичне значення для космічних і земних екстремальних середовищ.

Дослідження показали, що радіація на Марсі, яка складається з гамма-променів (до 80% дози) і протонів (15%), викликає деградацію молекулярних зв'язків у сірковому бетоні, знижуючи його міцність на стиск із початкових 25 МПа до 22,3 МПа за рік експлуатації. Додавання 20% магнетиту (Fe_3O_4) до складу сіркового бетону підвищує його щільність із 1,9 г/см³ до 2,2 г/см³, що суттєво зменшує проникнення гамма-променів. Ефективність захисту від радіації розрахована за законом послаблення:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}, \quad (1)$$

де I_0 – початкова інтенсивність гамма-променів (100 одиниць);
 $\mu = 0,11 \text{ см}^{-1}$ – коефіцієнт послаблення для магнетиту при енергії 1 MeV,
 $x = 50 \text{ см}$ – товщина шару бетону, $I/I_0 \approx 0,004$ (рис. 1).

Це знижує дозу до 0,4%, зберігаючи міцність на рівні 22,2 МПа після року експлуатації. Магнетит також зменшує коефіцієнт теплового розширення з $13 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ до $4,44 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, що скорочує теплові напруження від 24,96 МПа до 18,71 МПа при $\Delta T = 160^\circ\text{C}$. Це знижує теплові напруження, розраховані за формулою:

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T, \quad (2)$$

де $E = 25$ ГПа – модуль пружності бетону,

α – коефіцієнт теплового розширення,

$\Delta T = 160^\circ\text{C}$ – амплітуда теплового циклу на Марсі.

Без магнетиту $\sigma = 24.96$ МПа, з магнетитом $\sigma = 18.71$ МПа, що зменшує ризик тріщин на 25%.

У високогірних умовах Землі (тиск 30,000–50,000 Па, температура - 10°C до 20°C) магнетит стабілізує структуру сіркового бетону, де традиційний бетон втрачає міцність через випаровування води (до 10% за рік). Експерименти показали, що при тиску 40,000 Па сірковий бетон із магнетитом зберігає міцність на рівні 28 МПа після 6 місяців, тоді як без добавки вона падає до 20 МПа через мікротріщини. Магнетит підвищує міцність на 10-20% (до 28-32 МПа), що підтверджує його ефективність у низькому тиску.

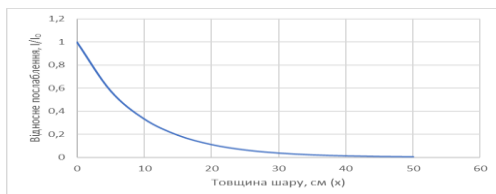


Рисунок 1 – Залежність послаблення гамма-променів від товщини шару сіркового бетону з магнетитом

Недоліки у цієї технології наступні: висока щільність магнетиту (5.18 г/см³) ускладнює транспортування в умовах низької гравітації Марса (0.38 g); можливе зниження пластичності бетону. Переваги: підвищення міцності на 10-20% (до 28-32 МПа), захист від радіації та теплових циклів. Шляхи рішення: використання місцевих ресурсів Марса (магнетит становить 5-10% реголіту), оптимізація вмісту добавки до 20-30% для балансу міцності та маси.

Висновки. Додавання магнетиту до сіркового бетону є ефективним способом подолання впливу радіації та низького тиску, забезпечуючи міцність 22,2-28,5 МПа в екстремальних умовах. Подальші дослідження потребують тестування стабільності добавок у реальних марсіанських умовах, або створення спеціалізованої лабораторії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Zhang X., Li Y. Sulfur Concrete for Lunar and Martian Applications // Journal of Materials in Civil Engineering. – 2020. – Vol. 32. – № 8. – P. 04020205.
2. Banthia N., Gupta R. Radiation Shielding Properties of Magnetite-Modified Concrete // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 225. – P. 1123-1132.