

Новий композитний матеріал на основі важкого бетону і базальт-борної фібри для радіаційного захисту від нейтронного випромінювання

Романенко І.М.

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0090-8871>

Голюк М.І.

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9233-9287>

Носовський А.В.

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2594-3780>

Власенко Т.С.

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1743-4652>

Гулік В.І.

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3790-8392>

Для безпечної експлуатації різних джерел радіоактивного випромінювання необхідно мати надійний радіаційний захист. Захист від радіоактивного випромінювання досліджується дуже давно, як в нашій країні так і за кордоном. Але на сьогодні все ж існує потреба в розробці нових композитних матеріалів, що будуть забезпечувати захист від радіоактивного випромінювання та матимуть покращені механічні та економічні характеристики.

Представлено новий композитний матеріал для радіаційного захисту на основі важкого бетону з серпентинітом, армованого базальт-борною фіброю, з різними концентраціями оксиду бору, для використання в біологічному захисті в атомній енергетиці. Захисні властивості нового композитного матеріалу були досліджені з різними джерелами нейтронного випромінювання, а саме: 1) нейтрони з енергією 14 МеВ; 2) швидкі нейтрони, що утворюються при поділі U-235 (джерело спектра поділу U-235); 3) швидкі нейтрони поділу U-235 після проходження шару води.

Виконано моделювання проходження нейтронного випромінювання в цьому бетоні і в бетоні зі щебенем за допомогою Монте-Карло коду *Serpent*. Показано, що додавання базальт-борної фібри в бетон покращує захисні властивості бетону від нейтронного випромінювання для нейтронів з різними енергіями, але найбільш ефективним є додавання фібри у випадку теплових нейтронів.

Ключові слова: базальт-борна фібра, серпентиніт, важкий бетон, радіаційний захист, Монте-Карло код *Serpent*, моделювання нейтронного випромінювання.

© Романенко І. М., Голюк М. І., Носовський А. В., Власенко Т. С., Гулік В. І., 2019

Для безпечної експлуатації різних джерел радіоактивного випромінювання необхідно мати надійний радіаційний захист. На сьогоднішній день у світі існує багато різних джерел радіаційного випромінювання, таких як традиційні ядерні реактори, термоядерні реактори, нейтронні генератори, установки плазмового фокуса та інші. Ці джерела випромінювання використовуються з промисловою, науковою та медичною метою.

Хоча захист від радіаційного випромінювання досліджується дуже давно, але все ж існує потреба в розробці нових матеріалів, які будуть більш ефективно захищати від випромінювання [1–12].

На даний момент існують різні види захисту від радіаційного випромінювання, але самий поширений — важкий бетон з різними добавками [13]. Такі важкі бетони повинні мати захисні властивості, як від нейтронного випромінювання, так і від гамма-випромінювання. Наприклад, для захисту від гамма-випромінювання необхідно використовувати матеріали з великим значенням атомного номера Z . Як наслідок, для захисту від гамма-випромінювання найбільше застосування знайшли, в якості наповнювачів, такі природні мінерали як — барит, який містить багато барію, магнетит — містить титан та залізо, і серпентиніт [14]. Для реакторів типу ВВЕР в якості біологічного захисту використовують важкий бетон з серпентинітом. Серпентиніт містить такі важні елементи як залізо та магній.

Окрім важких мінералів бетон повинен містити елементи які добре розсіюють та поглинають нейтрони. За замовчуванням, бетон містить велику кількість водню, на ядрах якого відбувається ефективне розсіювання нейтронів.

В попередніх статтях автори запропонували новий матеріал для захисту від нейтронного та гамма випромінювання, яким є важкий бетон, армований базальтовою фіброю [1, 13, 15, 16].

Ця стаття є продовженням двох попередніх статей, надрукованих в журналі «Ядерна та радіаційна безпека», де було проведено дослідження захисних характеристик важкого бетону, армованого звичайною базальтовою фіброю в якості захисту від гамма-випромінювання [15] та від нейтронного випромінювання [16].

У цій статті автори пропонують новий тип композитного матеріалу, заснований на важкому бетоні, армований покращеною базальт-борною фіброю (ББФ), в яку у процесі виробництва додають оксид бору. Захисні властивості нового композитного матеріалу були досліджені з різними джерелами нейтронного випромінювання.

Модель та методи. Використані матеріали

Бетон. У цьому дослідженні використовувався той же тип бетону, що і в двох попередніх статтях [15, 16], елементний склад цього бетону був показаний в статті [15] з двома видами агрегатів (зі звичайним щебенем і з баритом). У цій статті агрегат з бариту був замінений на агрегат з серпентинітом, який набув найбільшого поширення у вітчизняній атомній енергетиці.

Серпентиніт. Серпентиніт — це метаморфічна щільна гірська порода, що складається в основному з мінералу класу силікатів — серпентина $[\text{Mg}_3(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8]$. При цьому ця порода має щільність 2,4–2,9 г/см³, твердість 2,4–3,5, міцність 40–60 МПа. У серпентинітовій породі присутній великий вміст хімічно зв'язаної води, яка може досягати 10–15 вагових відсотків [14].

Хімічний склад серпентиніта взятий із статті [17], і представлений в таблиці 1.

Таблиця 1. Хімічний склад серпентиніта в вагових відсотках

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	H ₂ O
41,530	0,716	0,718	0,624	40,928	14,792

Базальт-борна фібра. Використання базальт-борної фібри в якості армуючого матеріалу для важкого бетону, призначеного для захисту від нейтронного випромінювання, було запропоновано одним із співавторів в статті [13]. Пропозиція додавати базальтову фібру, що містить бор, базується на тому, що в бетоні достатньо водню, який буде сповільнювати нейтрони, і якщо ми додамо матеріал з великим перерізом нейтронів (наприклад, В-10), то в сукупності це може стати дуже ефективним захисним матеріалом від нейтронного випромінювання.

У цій статті досліджуються в якості армуючого матеріалу, два типи базальт-борної фібри, з різними концентраціями оксиду бору. Перший тип базальтової фібри (представлений в тексті як *ББФ5*) містить 5 % В₂O₃ і 95 % базальту. Другий тип базальтової фібри (представлений в тексті як *ББФ10*), містить 10 % В₂O₃ і 90 % базальту. Процес виробництва ББФ докладно описаний в статті [13]. Хімічний склад базальтової фібри без додавання бору показаний в статті [15].

У цьому дослідженні розглянуто чотири основні типи бетонних сумішей, які представлені у такий спосіб:

- бетонна суміш зі щебенем плюс додавання *ББФ5* різних дозувань (далі іменується *БцББФ5*);
- бетонна суміш зі щебенем плюс додавання *ББФ10* різних дозувань (далі іменується *БцББФ10*);
- бетонна суміш з серпентинітом плюс додавання *ББФ5* різних дозувань (далі іменується *БсББФ5*);
- бетонна суміш з серпентинітом плюс додавання *ББФ10* різних дозувань (далі іменується *БсББФ10*).

Елементний склад *ББФ5* наведено в Таблиці 2.

Елементний склад *ББФ10* наведено в Таблиці 3.

Таблиця 2. Елементний склад *ББФ5* у вагових частках

O	4,65744×10 ⁻¹	Mg	3,60921×10 ⁻²
Na	1,33907×10 ⁻²	Ti	6,83332×10 ⁻³
Al	7,64748×10 ⁻²	Mn	1,26551×10 ⁻³
Si	2,36082×10 ⁻¹	P	5,34855×10 ⁻⁴
K	1,23818×10 ⁻²	B-10	2,86187×10 ⁻³
Ca	5,86625×10 ⁻²	B-11	1,26657×10 ⁻²
Fe	7,70118×10 ⁻²		

Таблиця 3. Елементний склад *ББФ10* у вагових частках

O	4,77518×10 ⁻¹	Mg	3,41925×10 ⁻²
Na	1,26859×10 ⁻²	Ti	6,47368×10 ⁻³
Al	7,24497×10 ⁻²	Mn	1,19890×10 ⁻³
Si	2,23656×10 ⁻¹	P	5,06705×10 ⁻⁴
K	1,17301×10 ⁻²	B-10	5,72375×10 ⁻³
Ca	5,55749×10 ⁻²	B-11	2,53314×10 ⁻²
Fe	7,29585×10 ⁻²		

Модель

В рамках даної роботи розроблена нейтронно-фізична модель для дослідження перенесення нейтронів в суміші бетону з базальт-борною фіброю і різними агрегатами за допомогою Монте-Карло коду Serpent (див. Рисунок 1).

Ця модель дозволяє проводити розрахунок переносу нейтронів в бетонних шарах з різною товщиною і різною кількістю шарів. Всі нейтрони рухаються від точкового джерела нейтронів через бетонні шари в сторону детектора. Були змодельовані джерела нейтронів для трьох наступних випадків: А) нейтрони з енергією 14 МеВ; В) швидкі нейтрони, що утворюються при поділі U-235 (джерело спектра поділу U-235); С) швидкі нейтрони поділу U-235 після проходження шару води. В результаті проходження швидкими нейтронами поділу шару води частина нейтронів сповільнюється до теплових енергій. Всі три випадки джерел нейтронів мали різні спектри: А) Спектр швидких нейтронів з енергією 14 МеВ (див. Рисунок 2); В) Спектр швидких нейтронів поділу U-235 (див. Рисунок 3); С) Спектр сповільнених нейтронів поділу U-235 (див. Рисунок 4).

Варто звернути увагу, що потоки нейтронів на рисунках 2–4 були порашовані в нормуванні на один нейтрон зовнішнього джерела. На Рисунок 4 спектр нейтронів майже повністю повторює спектр нейтронів в реакторі типу ВВЕР.

Для перших двох джерел (для випадків А і В) між джерелом нейтронів і шарами бетону знаходився шар повітря шириною 47,5 см. Для третього джерела (випадок С) між джерелом нейтронів і шарами бетону знаходився шар води шириною 47,5 см. Представлена схема може

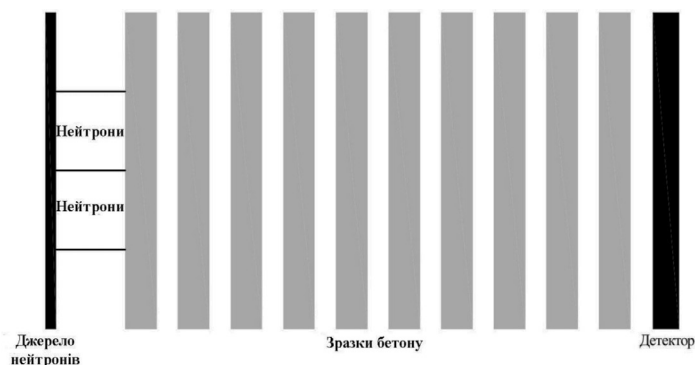


Рисунок 1 — Розроблена схема перенесення нейтронів в бетоні

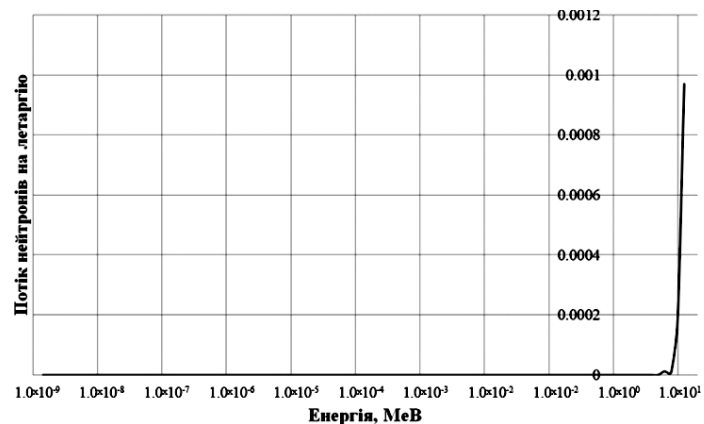


Рисунок 2 — Спектр нейтронів в детекторі для випадку А (нейтрони з енергією 14 МеВ)

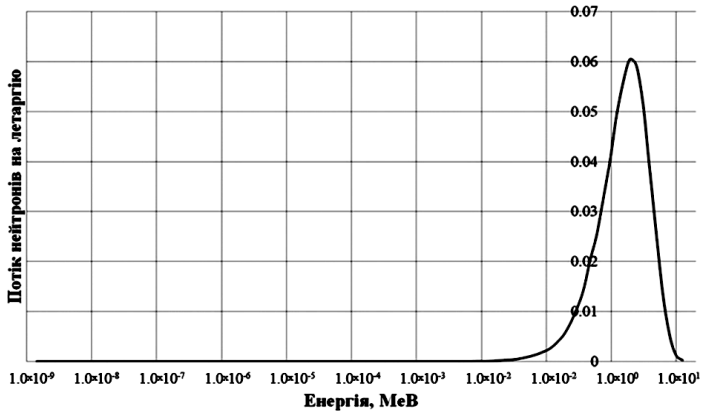


Рисунок 3 — Спектр нейтронів в детекторі для випадку В (джерело спектра поділу U-235)

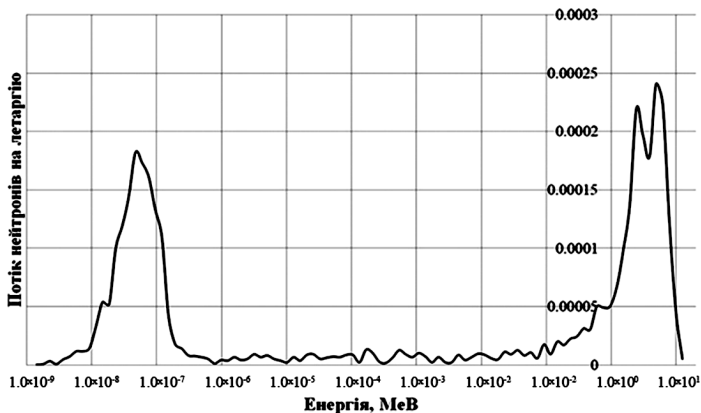


Рисунок 4 — Спектр нейтронів в детекторі для випадку С (нейтрони поділу U-235 після проходження шару води)

використовувати до 10 шарів бетону між джерелом нейтронів і детектором по 10 см кожен. Детектор знаходиться після останнього шару бетону (див. Рисунок 1).

Метод розрахунку

Як і в попередніх статтях, у цій роботі використовувався Монте-Карло код Serpent, який розробляється з 2004 року в Фінляндії [18]. Цей код використовується для моделювання проходження нейтронів і гамма квантів в різних системах та матеріалах [19, 20].

Для визначення послаблення нейтронного випромінювання в запропонованому композитному матеріалі, ми використовували поняття швидкості передачі нейтронів в об'ємі детектора [1]. Швидкість передачі нейтронів, яка використовується для аналізу перенесення нейтронів в бетоні, визначається за такою формулою [21]:

$$T_f = F_n / F_0$$

де T_f — швидкість передачі нейтронів, F_n — потік нейтронів в об'ємі детектора з n шарами (10 см кожен) бетону, F_0 — потік нейтронів в об'ємі детектора без шарів бетону в моделі ($n = 0$). Для випадку С, F_0 — потік нейтронів в об'ємі детектора після проходження шару води.

Результати розрахунку

На першому етапі, ми промоделиували проходження нейтронів в бетоні від першого джерела (випадок А). Було промодельоване проходження нейтронів в десяти шарах бетону (від 1 до 10) для всіх чотирьох типів бетонів (*БцББФ5*, *БцББФ10*, *БсББФ5*, *БсББФ10*). При цьому у всіх бетонах дозування базальт-борної фібри змінювалося від 5 до 100 кг на кубометр бетону (5 кг, 10 кг, 15 кг, 20 кг, 30 кг, 40 кг, 50 кг, 60 кг, 70 кг, 80 кг, 90 кг, 100 кг). Залежність швидкості передачі нейтронів від кількості шарів бетону для випадків *БцББФ5*, *БцББФ10*, *БсББФ5*, *БсББФ10* представлені на рисунках 5–8. На цих рисунках представлені зміни швидкості передачі нейтронів для бетону без фібри, з додаванням фібри в кількості 5 кг, 30 кг і 100 кг на кубометр бетону.

З рисунків 5–8 видно, що для 14 МеВ нейтронів захисні характеристики бетонів незначно покращуються при додаванні обох типів базальт-борної фібри. Також, спостерігається незначне зменшення швидкості передачі нейтронів для бетонів з серпентинітом в порівнянні з бетонами зі щебенем для третього і четвертого шарів бетону. Варто звернути увагу, що вже після 6-го шару бетону немає принципової різниці в швидкості передачі нейтронів, тому для наступного джерела нейтронів розрахунки були виконані тільки для перших п'яти шарів бетону.

На рисунках 9, 10 представлені швидкості передачі нейтронів для всіх розглянутих типів бетонів для дозування фібри 10 і 30 кг відповідно.

З рисунків 9, 10 чітко видно перевагу бетонів з важким агрегатом над бетонами зі щебенем. Цей ефект детально було розглянуто в нашій минулій статті [16].

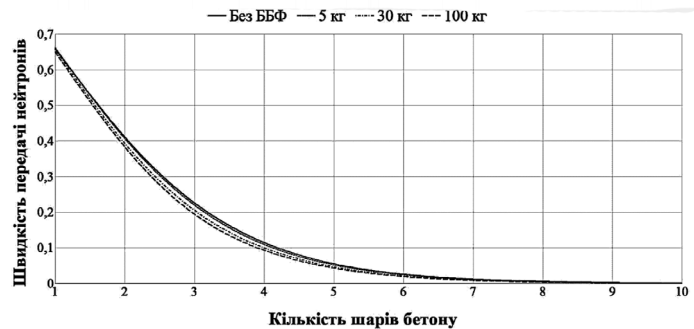


Рисунок 5 — Залежність швидкості передачі нейтронів від кількості шарів бетону і різного дозування ББФ для випадку *БцББФ5*

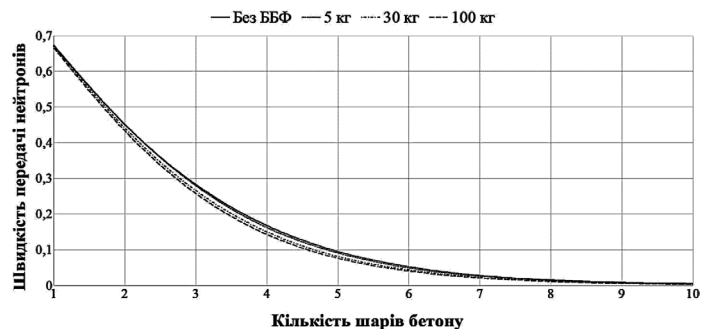


Рисунок 6 — Залежність швидкості передачі нейтронів від кількості шарів бетону і різного дозування ББФ для випадку *БцББФ10*

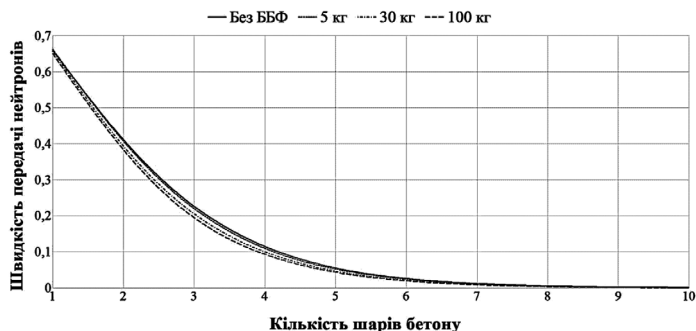


Рисунок 7 — Залежність швидкості передачі нейтронів від кількості шарів бетону і різного дозування ББФ для випадку БсББФ5

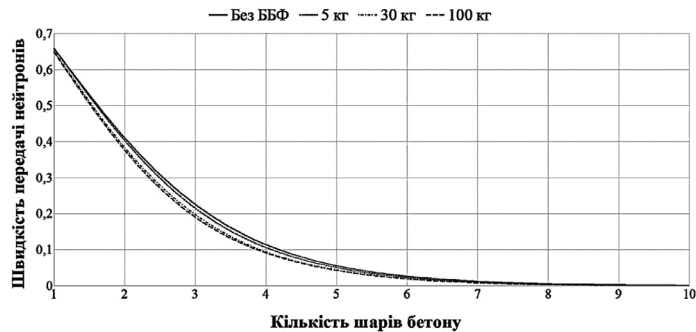


Рисунок 8 — Залежність швидкості передачі нейтронів від кількості шарів бетону і різного дозування ББФ для випадку БсББФ10

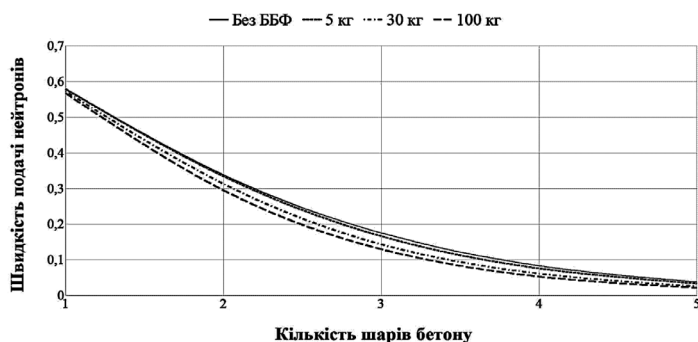


Рисунок 11 — Залежність швидкості передачі нейтронів від кількості шарів бетону і різного дозування ББФ для випадку БцББФ5

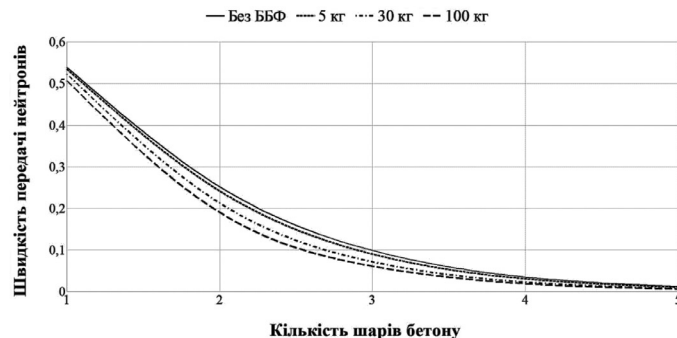


Рисунок 12 — Залежність швидкості передачі нейтронів від кількості шарів бетону і різного дозування ББФ для випадку БцББФ10

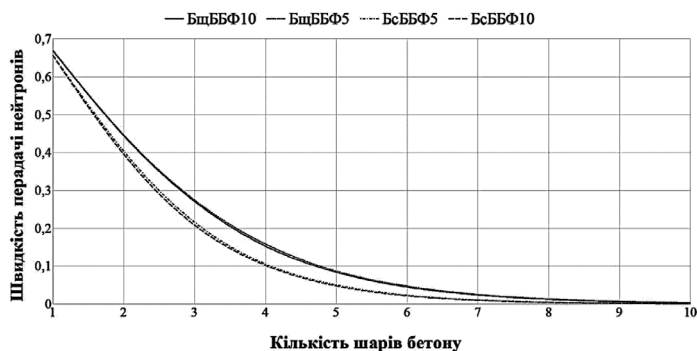


Рисунок 9 — Залежність швидкості передачі нейтронів від кількості шарів бетону для 10 кг ББФ для чотирьох випадків бетонних сумішей

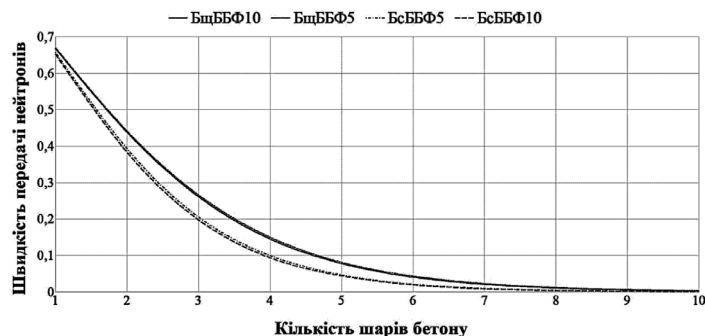


Рисунок 10 — Залежність швидкості передачі нейтронів від кількості шарів бетону для 30 кг ББФ для чотирьох випадків бетонних сумішей

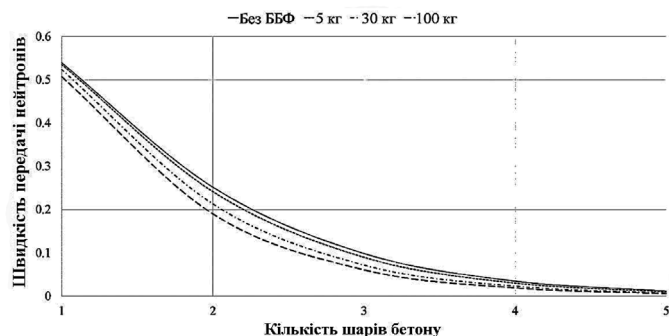


Рисунок 13 — Залежність швидкості передачі нейтронів від кількості шарів бетону і різного дозування ББФ для випадку БсББФ5

На другому етапі, ми промодельовали проходження нейтронів в бетоні від другого джерела (випадок В). Було промодельовано проходження нейтронів в п'яти шарах бетону (від 1 до 5) для всіх чотирьох типів бетонів (БцББФ5, БцББФ10, БсББФ5, БсББФ10). При цьому у всіх бетонах дозування базальт-борної фібри змінювалася від 5 до 100 кг на кубометр бетону (5 кг, 15 кг, 30 кг, 60 кг і 100 кг). Залежність швидкості передачі нейтронів від кількості шарів бетону для випадків БцББФ5, БцББФ10, БсББФ5, БсББФ10 представлені на рисунках 11–14 відповідно. На цих рисунках представлені зміни швидкості передачі нейтронів для бетону без фібри, з додаванням фібри в кількості 5 кг, 30 кг і 100 кг на кубометр бетону.

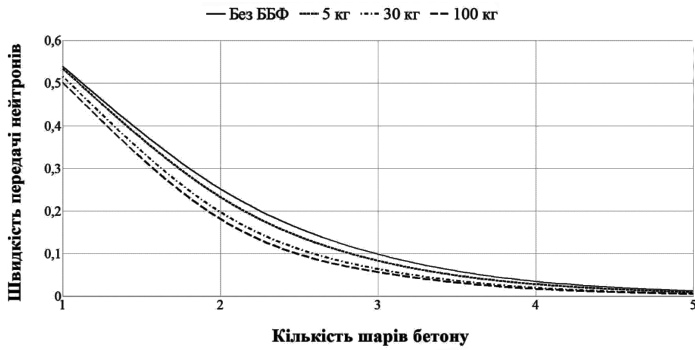


Рисунок 14 — Залежність швидкості передачі нейтронів від кількості шарів бетону і різного дозування ББФ для випадку *БсББФ10*

З рисунків 11–14 видно, що для менш швидкісних нейтронів захисні характеристики бетонів поліпшуються при додаванні обох типів базальт-борної фібри в порівнянні з 14 MeV нейтронами. Порівняння бетонів армованих базальтовою фіброю з різним вмістом оксиду бору, показує зменшення швидкості передачі нейтронів при використанні 10 % оксиду бору в порівнянні з 5 % оксиду бору (див. Рисунки 11, 12 для щелевеного заповнювача і рисунки 13, 14 для заповнювача з серпентинітом). Варто звернути увагу, що ефективність додавання базальт-борної фібри яскраво виражена при товщині бетону 15–30 см для серпентиніта і при товщині бетону 20–40 см для щебеню.

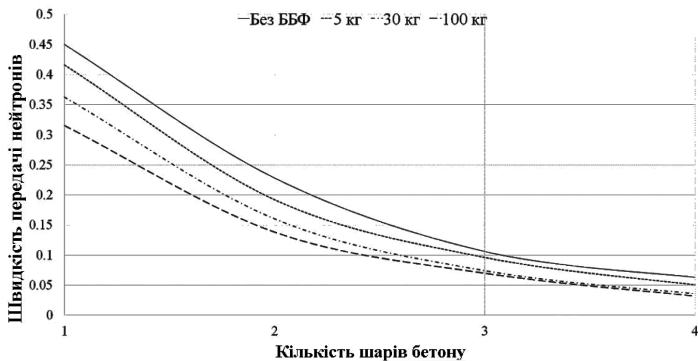


Рисунок 15 — Залежність швидкості передачі нейтронів від кількості шарів бетону і різного дозування ББФ для випадку *БцББФ5*

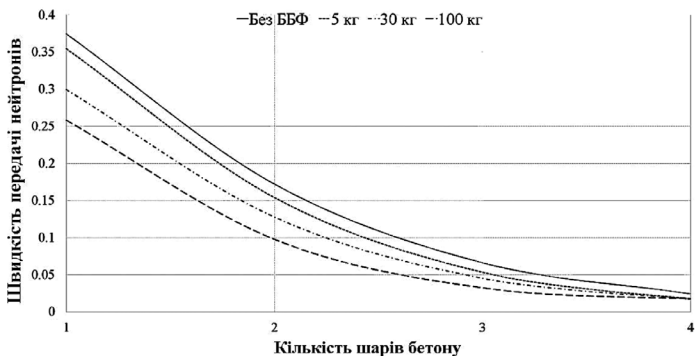


Рисунок 17 — Залежність швидкості передачі нейтронів від кількості шарів бетону і різного дозування ББФ для випадку *БсББФ5*

На третьому етапі, ми промодельовали проходження нейтронів в бетоні від третього джерела (випадок С). Було промодельоване проходження нейтронів в чотирьох шарах бетону (від 1 до 4) для всіх чотирьох типів бетонів (*БцББФ5*, *БцББФ10*, *БсББФ5*, *БсББФ10*). Тільки чотири шари було вибрано, так як на п'ятому шарі кількість нейтронів була дуже мала і дуже мало відрізнялася від кількості нейтронів у четвертому шарі. При цьому у всіх бетонах дозування базальт-борної фібри змінювалося від 5 до 100 кг на кубометр бетону (5 кг, 15 кг, 30 кг, 60 кг і 100 кг). Залежність швидкості передачі нейтронів від кількості шарів бетону для випадків *БцББФ5*, *БцББФ10*, *БсББФ5*, *БсББФ10* представлені на рисунках 15 – 18 відповідно. На цих рисунках представлені зміни швидкості передачі нейтронів для бетону без фібри, з додаванням фібри в кількості 5 кг, 30 кг і 100 кг на кубометр бетону.

Рисунки 15–18 демонструють кращі захисні властивості бетонів з додаванням базальт-борної фібри для випадку теплових нейтронів в порівнянні зі швидкими нейтронами. Це природно, тому що переріз поглинання нейтронів бору-10 набагато вище в тепловій області ніж у швидкій. З цих рисунків також видно, що бетони з серпентинітом (*БсББФ5*, *БсББФ10*) більш ефективні ніж бетони із звичайним щебенем (*БцББФ5*, *БцББФ10*). Наведені рисунки демонструють, що ефективність додавання базальт-борної фібри вже добре видно при товщині бетону 10–20 см для щебеню і при товщині бетону 10–15 см для серпентиніта.

Всі представлені дослідження демонструють позитивний ефект додавання базальт-борної фібри на захисні характеристики бетону від нейтронного випромінювання.

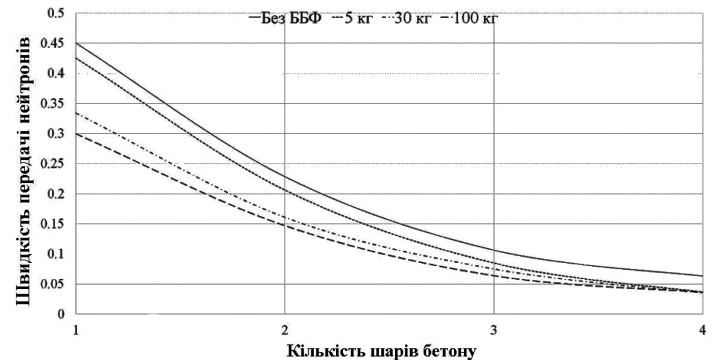


Рисунок 16 — Залежність швидкості передачі нейтронів від кількості шарів бетону і різного дозування ББФ для випадку *БцББФ10*

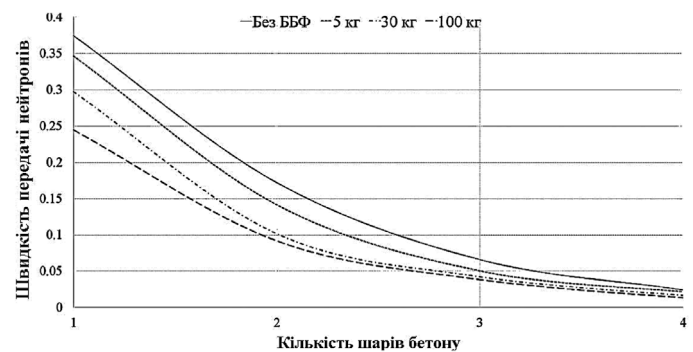


Рисунок 18 — Залежність швидкості передачі нейтронів від кількості шарів бетону і різного дозування ББФ для випадку *БсББФ10*

Висновки

У цій статті досліджено характеристики згасання нейтронного випромінювання в бетонах армованих базальт-борної фіброю. При цьому були промодельовані нейтрони з трьома різними енергетичними спектрами. За допомогою Монте-Карло коду Serpent була розроблена нейтронно-фізична модель для дослідження переносу нейтронів різних енергій в бетонах з різною товщиною.

У даному дослідженні аналізуються захисні властивості бетону з додаванням базальтової фібри з різним вмістом оксиду бору (5 % і 10 %). Було показано, що фібра з більшим вмістом оксиду бору (10 %) працює краще, ніж фібра з меншим вмістом оксиду бору (5 %). Також варто відзначити, що додавання важкого агрегату (в даному випадку серпентиніта) покращує захисні властивості бетону від нейтронного випромінювання в порівнянні з використанням звичайного щебеню в якості агрегату.

Представлені результати показують, що бетон з додаванням базальт-борної фібри має значний потенціал для використання в атомній енергетиці в якості захисного матеріалу від нейтронного випромінювання. Особливо яскраво це виражено у випадку теплових нейтронів. Такий композитний матеріал має відносно невелику вартість, поліпшені механічні властивості і значну довговічність.

Список використаної літератури

1. Irbýker C., Nulk H., Gulik V., Biland A., Tkaczyk A.H. Radiation shielding properties of a novel cement-basalt mixture for nuclear energy applications. *Nuclear Engineering and Design*. 2015. No. 284. P. 27–37.
2. Singh V. P., Badiger N.M. Investigation on radiation shielding parameters of ordinary, heavy and super heavy concretes. *Nuclear Technology & Radiation Protection*. 2014. No 29, P. 149–156.
3. Singh V. P., Badiger N.M. Gamma ray and neutron shielding properties of some alloy materials. *Annals of Nuclear Energy*. 2014. No 64, P. 301–310.
4. Icelli O., Yalcin Z., Okutan M., Boncukcuoglu R. Determination of photon energy absorption parameters for pellet waste, trommel sieve waste and original tinalconite. *Annals of Nuclear Energy*. 2012. No 47. P. 38–45.
5. Sidhu B. S., Dhaliwal A. S., Mann K. S., Kahlon K. S. Study of mass attenuation coefficients, effective atomic numbers and electron densities for some low Z compounds of dosimetry interest at 59.54 keV incident photon energy. *Annals of Nuclear Energy*. 2012. No 42, P. 153–157.
6. Singh N., Singh K. J., Singh K., Singh H. Comparative study of lead borate and bismuth lead borate glass systems as gamma-radiation shielding materials. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*. 2004. No 225. P. 305–309.
7. Sharma R., Sharma V., Singh P.S., Singh, T. Effective atomic numbers for some calcium-strontium-borate glasses. *Annals of Nuclear Energy*. 2012. No 45, P. 144–149.
8. El-Khayatt A. M., Akkurt I. Photon interaction, energy absorption and neutron removal cross section of concrete including marble. *Annals of Nuclear Energy*. 2013. No 60. P. 8–14.
9. Singh V. P., Badiger N. M. Gamma photon exposure buildup factors for some spin ice compounds using g-P fitting method. *Journal of Nuclear Physics, Material Sciences, Radiation and Applications*. 2015. No 2 (2), P. 169–179.
10. Masleuddin M., Naqvi A. A., Ibrahim M., Kalakada Z. Radiation shielding properties of concrete with electric arc furnace slag aggregates and steel shots. *Annals of Nuclear Energy*. 2013. No 53. P. 192–196.
11. Malkapur S. M., Satdive H., Narasimhan M. C., Karkera N. B., Goverdhan P., Sathian V. Effect of mix parameters and hydrogen

loading on neutron radiation shielding characteristics of latex modified concrete mixes. *Progress in Nuclear Energy*. 2015. No 83. P. 8–12.

12. Kharita M. H., Yousef S., AlNassar M. Review on the addition of boron compounds to radiation shielding concrete. *Progress in Nuclear Energy*. 2011. No 53. P. 207–211.

13. Zorla E., Irbýker C., Biland A., Kiisk M., Kovaljov S., Tkaczyk A. H., Gulik V. Radiation shielding properties of high performance concrete reinforced with basalt fibers infused with natural and enriched boron. *Nuclear Engineering and Design*. 2017. No 313, P. 306–318.

14. Дубровський Б., Кирилов А., Конвіз, В., та ін. Будівництво атомних електростанцій./ за ред. Дубровського Б. -2-е вид., перероб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1987. 248 с.

15. Романенко І., Голюк М., Носовський А., Гулік В. Дослідження нового композитного матеріалу на основі надважких бетонів і базальтової фібри для радіаційного захисту від гамма-випромінювання. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2018. Вип.1(77). С. 63–69.

16. Романенко І., Голюк М., Носовський А., Власенко Т., Гулік В. Дослідження нового композитного матеріалу на основі надважких бетонів і базальтової фібри для радіаційного захисту від нейтронного випромінювання. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2018. Вип.3(79). С. 42–47.

17. Page N. Chemical differences among the serpentine “polymorphs”. *The American mineralogist*. 1968. V. 53.

18. Leppänen J., Pusa M., Viitanen T., Valtavirta V., Kaltiaisenaho T. The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013. *Annals of Nuclear Energy*. 2015. Vol. 82, P. 142–150.

19. Kaplan M. F. Concrete Radiation Shielding, John Wiley & Sons, Inc. NewYork. 1989. 448 p.

20. Manohara S. R., Hanagodimath S. M., Gerward L. Photon interaction and energy absorption in glass: a transparent gamma ray shield. *Journal of Nuclear Materials*. 2009. No. 393, P. 465–472.

21. Sharifi Sh., Bagheri R., Shirmardi S. Comparison of shielding properties for ordinary, barite, serpentine and steel-magnetite concretes using MCNP-4C code and available experimental results. *Annals of Nuclear Energy*. 2013. No 53. P. 529–534.

References

1. Irbýker, C., Nulk, H., Gulik, V., Biland, A., Tkaczyk, A.H. (2015). Radiation shielding properties of a novel cement-basalt mixture for nuclear energy applications. *Nuclear Engineering and Design*, No. 284, pp. 27–37.
2. Singh, V., Badiger, N. (2014). Investigation on radiation shielding parameters of ordinary, heavy and super heavy concretes. *Nuclear Technology & Radiation Protection*, No. 29, pp. 149–156.
3. Singh, V., Badiger, N. (2014). Gamma ray and neutron shielding properties of some alloy materials. *Annals of Nuclear Energy*, No. 64, pp. 301–310.
4. Icelli, O., Yalcin, Z., Okutan, M., Boncukcuoglu, R. (2012). Determination of photon energy absorption parameters for pellet waste, trommel sieve waste and original tinalconite. *Annals of Nuclear Energy*, No. 47, pp. 38–45.
5. Sidhu, B., Dhaliwal, A., Mann, K., Kahlon, K. (2012). Study of mass attenuation coefficients, effective atomic numbers and electron densities for some low Z compounds of dosimetry interest at 59.54 keV incident photon energy. *Annals of Nuclear Energy*, No. 42, pp. 153–157.
6. Singh, N., Singh, K., Singh, K., Singh, H. (2004). Comparative study of lead borate and bismuth lead borate glass systems as gamma-radiation shielding materials. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, No. 225, pp. 305–309.
7. Sharma, R., Sharma, V., Singh, P., Singh, T. (2012). Effective atomic numbers for some calcium-strontium-borate glasses. *Annals of Nuclear Energy*, No. 45, pp. 144–149.
8. El-Khayatt, A.M., Akkurt, I. (2013). Photon interaction, energy absorption and neutron removal cross section of concrete including marble. *Annals of Nuclear Energy*, No. 60, pp. 8–14.
9. Singh, V., Badiger, N. (2015). Gamma photon exposure buildup factors for some spin ice compounds using g-P fitting method. *Journal of Nuclear Physics, Material Sciences, Radiation and Applications*, 2(2), pp. 169–179.

10. Maslehuddin, M., Naqvi, A. A., Ibrahim, M., Kalakada, Z. (2013). Radiation shielding properties of concrete with electric arc furnace slag aggregates and steel shots. *Annals of Nuclear Energy*, No. 53, pp. 192–196.
11. Malkapur, S.M., Satdive, H., Narasimhan, M.C., Karkera, N.B., Goverdhan, P., Sathian, V. (2015). Effect of mix parameters and hydrogen loading on neutron radiation shielding characteristics of latex modified concrete mixes. *Progress in Nuclear Energy*, No. 83, pp. 8–12.
12. Kharita, M. H., Yousef, S., AlNassar, M. (2011). Review on the addition of boron compounds to radiation shielding concrete. *Progress in Nuclear Energy*, No. 53, pp. 207–211.
13. Zorla, E., Irbeker, C., Biland, A., Kiisk, M., Kovaljov, S., Tkaczyk, A. H., Gulik, V. (2017). Radiation shielding properties of high performance concrete reinforced with basalt fibers infused with natural and enriched boron. *Nuclear Engineering and Design*, No. 313, pp. 306–318.
14. Dubrovsky, B., Kirillov, A., Conviz, V., et al. (1987). Construction of nuclear power plants. Moscow: Energoatomovoyd, 248 p.
15. Romanenko, I., Holiuk, M., Nosovsky, A., Gulik, V. (2018). Investigation of novel composite material based on extra-heavy concrete and basalt fiber for gamma radiation protection properties. *Nuclear and Radiation Safety*, 1(77), pp. 63–69.
16. Romanenko I., Holiuk M., Nosovsky A., Vlasenko T., Gulik V. (2018), Investigation of a new composite material based on ultra-heavy concrete and basalt fiber for radiation protection from neutron radiation. *Nuclear and Radiation Safety*, 3(79), pp. 42–47.
17. Page, N. (1968). Chemical differences among the serpentine “polymorphs”. *The American mineralogist*, Vol. 53.
18. Leppnen, J., Pusa, M., Viitanen, T., Valtavirta, V., Kaltaiainenaho, T. (2015). The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013. *Annals of Nuclear Energy*. No. 82, pp. 142–150.
19. Kaplan, M. F. (1989). Concrete radiation shielding. New York, John Wiley & Sons, Inc., 448 p.
20. Manohara, S. R., Hanagodimath, S. M., Gerward, L. (2009). Photon interaction and energy absorption in glass: a transparent gamma ray shield. *Journal of Nuclear Materials*, No. 393, pp. 465–472.
21. Sharifi, Sh., Bagheri, R., Shirmardi, S. (2013). Comparison of shielding properties for ordinary, barite, serpentine and steel-magnetite concretes using MCNP-4C code and available experimental results. *Annals of Nuclear Energy*, No. 53, pp. 529–534.

New Composite Material Based on Heavy Concrete and Basalt-Boron Fiber for Neutron Radiation Shielding Properties

Romanenko I. ¹, Holiuk M. ¹, Nosovsky A. ¹, Vlasenko T. ¹, Gulik V. ^{1,2}

¹ Institute for Safety Problems of NPP, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

² Institute of Physics, University of Tartu, Tartu, Estonia

It is necessary to have reliable radiation protection for safe operation of different radiation sources. Radiation shielding properties have been studied for a long time both in our country and abroad. However, there is a strong necessity to develop new composite materials, which will provide protection against radiation and have improved mechanical and economic characteristics.

The paper describes a new composite material for neutron radiation shielding properties based on heavy concrete with serpentinite aggregate and with basalt-boron fiber with different concentrations of fiber boron oxide for using in biological shielding in nuclear industry. Protective properties of the new composite material were investigated with different neutron sources: 1) neutrons with 14 MeV energy; 2) fast fission neutrons for U-235; 3) fast fission neutrons for U-235 after passing a water layer. The simulation of the neutron radiation in presented composite material with adding crushed stone aggregate and serpentinite aggregate is performed by Monte Carlo Serpent code.

It is shown that basalt-boron fibers in concrete improve the protective properties of concrete against neutron irradiation for neutrons with different energies, but the most effective is the addition of a basalt-boron fiber in the case of thermal neutrons.

This research was supported by Horizon 2020 ERA-NET Support Programme, Research Grant Agreement No 7.9–3/18/7 (“Development of Boron-Infused Basalt-Fiber Reinforced Concrete for Nuclear and Radioactive Waste Management Applications”). Implementation of activities described in the Roadmap to Fusion during Horizon 2020 through a joint programme of the members of the EUROfusion consortium (2014–2020), Work Package PMI. Also, this research was carried out with the financial support of the IAEA, within the terms and conditions of the Research Contract 20638 in the framework of the Coordinated Research Project (CRP) “Accelerator Driven Systems (ADS) Applications and Use of Low-Enriched Uranium in ADS (T33002)” within the Project “The Two-Zone Subcritical Systems with Fast and Thermal Neutron Spectra for Transmutation of Minor Actinides and Long-Lived Fission Products”.

Keywords: basalt-boron fiber, serpentinite, heavy concrete, radiation shielding properties, Monte Carlo Serpent code, neutron transport simulation

Новый композитный материал на основе тяжелого бетона и базальт-борной фибры для радиационной защиты от нейтронного излучения

Романенко И. М¹, Голук М. И¹, Носовский А. В¹, Власенко Т. С¹, Гулик В. И^{1,2}.

¹ Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, г. Киев, Украина

² Institute of Physics, University of Tartu, Tartu, Estonia

Для безопасной эксплуатации различных источников радиоактивного излучения необходимо иметь надежную радиационную защиту. Защита от радиоактивного излучения исследуется очень давно как в нашей стране, так и за рубежом. Но сегодня все же существует потребность в разработке новых композитных материалов, которые будут обеспечивать защиту от радиоактивного излучения и иметь улучшенные механические и экономические характеристики.

Представлен новый композитный материал для радиационной защиты на основе тяжелого бетона с серпентинитом, армированного базальт-борной фиброй, с различными концентрациями оксида бора, для использования в биологической защите в атомной энергетике. Защитные свойства нового композитного материала были исследованы с различными источниками нейтронного излучения, а именно: 1) нейтроны с энергией 14 МэВ; 2) быстрые нейтроны, образующиеся при делении U-235 (источник спектра деления U-235); 3) быстрые нейтроны деления U-235 после прохождения слоя воды.

Выполнено моделирование прохождения нейтронного излучения в этом бетоне и в бетоне со щебнем с помощью Монте-Карло кода Serpent. Показано, что добавление базальт-борной фибры в бетон улучшает защитные свойства бетона от нейтронного излучения для нейтронов с разными энергиями, но наиболее эффективно добавление фибры в случае тепловых нейтронов.

Ключевые слова: базальт-борная фибра, серпентинит, тяжелый бетон, радиационная защита, Монте-Карло код Serpent, моделирование нейтронного излучения.

Отримано 30.01.2019