

І. М. Романенко<sup>1</sup>, М. І. Голюк<sup>2</sup>,  
А. В. Носовський<sup>1</sup>, В. І. Гулік<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Інститут проблем безпеки АЕС НАН України,  
м. Київ, Україна

<sup>2</sup> ЗАТ «Базальтест», м. Тарту, Естонія

## Дослідження нового композитного матеріалу на основі надважких бетонів і базальтової фібри для радіаційного захисту від гамма-випромінювання

Представлено новий композитний матеріал для радіаційного захисту на основі надважкого бетону, армованого базальтовою фіброю, який може бути застосований у системах біологічного захисту в атомній енергетиці. Виконано моделювання проходження гамма-випромінювання в цьому матеріалі за допомогою коду WinXCom. Показано, що додавання базальтової фібри в бетон не тільки покращує його механічні властивості та зменшує кількість і величину мікротріщин, але й збільшує здатність до захисту від гамма-випромінювання. Для значного покращення згасання гамма-випромінювання у фібробетон потрібно додавати важкий агрегат, наприклад барит.

Ключові слова: базальтова фібра, надважкий бетон, радіаційний захист, WinXCom код, моделювання гамма-випромінювання.

И. М. Романенко, М. И. Голюк, А. В. Носовский, В. И. Гулик

### Исследование нового композитного материала на основе сверхтяжелых бетонов и базальтовой фибры для радиационной защиты от гамма-излучения

Представлен новый композитный материал для радиационной защиты на основе сверхтяжелого бетона, армированного базальтовой фиброй, который может быть использован в системах биологической защиты в атомной энергетике. Выполнено моделирование прохождения гамма-излучения в этом материале с помощью кода WinXCom. Показано, что добавление базальтовой фибры в бетон не только улучшает его механические свойства и уменьшает количество и величину микротрещин, но и увеличивает его способность к защите от гамма-излучения. Для значительного улучшения затухания гамма-излучения в фибробетон нужно добавлять тяжелый агрегат, например барит.

Ключевые слова: базальтовая фибра, сверхтяжелый бетон, радиационная защита, WinXCom код, моделирование гамма-излучения.

© І. М. Романенко, М. І. Голюк, А. В. Носовський, В. І. Гулік, 2018

Захист від радіаційного випромінювання є важливим фактором безпечної роботи ядерних реакторів, сховищ зберігання відпрацьованого ядерного палива та радіоактивних відходів, а також наукового та медичного обладнання, в якому використовуються джерела іонізуючого випромінювання. Надійна експлуатація АЕС має бути забезпечена протягом всього життєвого циклу, охоплюючи етап зняття з експлуатації.

Основною причиною деградації та руйнування залізобетонних конструкцій на АЕС є виникнення тріщин у бетоні [1]. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми для нових енергоблоків АЕС є застосування нових видів бетону, наприклад бетону, армованого фіброю; такий матеріал має покращені властивості, зокрема з імовірності виникнення мікротріщин у бетоні та швидкості їх формування [2–5].

Металева фібра має суттєві недоліки: високий вплив корозії, нерівномірний розподіл у бетонній матриці та значний рівень корозії металу протягом експлуатації АЕС (до 60 років) [6]. Тому в представленому дослідженні автори пропонують використовувати на об'єктах атомної енергетики новий композитний матеріал на основі бетону та базальтової фібри.

Мета статті — проаналізувати зміну параметрів згасання гамма-випромінювання для двох різних бетонних сумішей, армованих базальтовою фіброю: із звичайним щебнем та з баритом.

Згасання радіоактивного випромінювання в матеріалі визначається як втрата інтенсивності і/або енергії будь-якого випромінювання. Цей показник є найважливішим у дослідженнях властивостей матеріалів, які використовуються для радіаційного захисту на об'єктах атомної енергетики. У статті наведено результати розрахунків параметрів згасання гамма-випромінювання за допомогою програми WinXCom, а також визначено ефективну густину електронів і ефективний атомний номер досліджуваних матеріалів. Ці два параметри визначають ефективну масу матеріалу, що характеризує зовнішній вплив гамма-випромінювання на досліджений матеріал.

### Матеріали

**Базальтова фібра.** Ідея виділення волокон з базальту належить Paul Dhé (Париж, Франція), який отримав патент США на свій винахід у 1923 році. Проте до початку промислового виробництва безперервного базальтового волокна (БВВ) пройшли десятки років. Активні дослідження базальтового волокна для різних потреб, перш за все для військового застосування, розпочали у 1960-х роках Радянський Союз і США. Перший у світі завод з виробництва БВВ відкрився в м. Славута Хмельницької обл. у 1988 році [7].

Базальтову фібру отримують аналогічно фібри зі скляного волокна [8]. Виробництво базальтової фібри містить кілька етапів (рис. 1): приготування породи (1), плавка (2), формування волокна (3), покриття волокна замазлювачем (4), намотування волокна (5), сушіння волокна (6), рубка волокна й отримання фібри (7).

Проте процес виробництва БВВ простіший, ніж процес виробництва скляного волокна: він не потребує складного й дорогого процесу приготування шихти, а потребує тільки однієї лінії подачі роздробленої базальтової породи в піч для плавки. Базальтову породу спочатку роздроблюють, потім промивають, сушать та завантажують у контейнери, прикріплені до завантажувального пристрою, який перемищує базальт до ванни для плавки в газових печах.

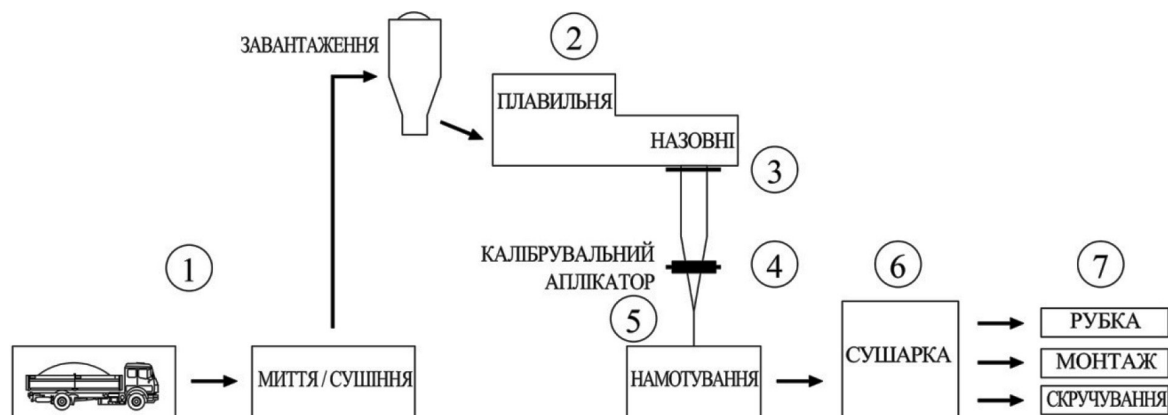


Рис. 1. Спрощена схема виробництва базальтової фібри

Низкою досліджень було показано, що бетон, армований базальтовою фіброю, має високі хімічну та корозійну стійкість, довговічність, стійкість до стирання, морозостійкість [9–14]. Оскільки питома густина базальтової фібри приблизно та сама, що й основних компонентів бетону, вона рівномірно розподіляється по всьому об'єму бетону на відміну від металевої та інших видів полімерної фібри [6]. Крім того, як показано у [15], застосування для армування бетону базальтової фібри в кілька разів дешевше, ніж металевої.

Враховуючи перспективи використання базальтової фібри в радіаційно небезпечних технологіях, зокрема при будівництві нових АЕС, треба дослідити залежність параметрів згасання гамма-випромінювання від матеріального складу бетонів з базальтовим волокном.

Хімічний склад базальтової фібри (у масових частках), наданий компанією US Basalt Corp. (USA) і використаний у цьому дослідженні, такий:

SiO <sub>2</sub> . . . . .	0,4947	CaO . . . . .	0,0825
TiO <sub>2</sub> . . . . .	0,0266	Na <sub>2</sub> O . . . . .	0,0428
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	0,1555	K <sub>2</sub> O . . . . .	0,0174
Fe <sub>(x)</sub> O <sub>(y)</sub> . . . . .	0,1022	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> . . . . .	0,0089
MnO . . . . .	0,002	S . . . . .	0,0004
MgO . . . . .	0,0479	Cl . . . . .	0,0001

**Бетон.** Бетон — це композитний матеріал, що складається з цементу, води та агрегатів (наповнювачів). Проектні терміни служби сучасних енергоблоків АЕС — 60 років; з урахуванням часу на роботи із зняття з експлуатації

Таблиця 1. Елементний склад бетону зі щебенем і базальтовою фіброю

Елемент	Дозування базальтової фібри, кг/м <sup>3</sup>						
	0	1	3	5	10	20	50
H	0,011204	0,011201	0,011195	0,011188	0,011172	0,011140	0,011042
O	0,489628	0,489596	0,489536	0,489469	0,489311	0,488993	0,488041
C	0,012732	0,012731	0,012728	0,012725	0,012718	0,012704	0,012663
Na	0,008631	0,008636	0,008648	0,008661	0,008691	0,008752	0,008935
Al	0,038246	0,038266	0,038303	0,038345	0,038444	0,038643	0,039238
Si	0,205710	0,205655	0,205549	0,205433	0,205155	0,204599	0,202932
K	0,010253	0,010254	0,010256	0,010258	0,010264	0,010276	0,010311
Ca	0,180831	0,180850	0,180888	0,180929	0,181028	0,181226	0,181819
Fe	0,023487	0,023511	0,023557	0,023608	0,023728	0,023969	0,024693
Mg	0,015641	0,015652	0,015675	0,015701	0,015759	0,015878	0,016235
S	0,000260	0,000260	0,000260	0,000261	0,000261	0,000263	0,000268
Ti	0,001633	0,001639	0,001652	0,001666	0,001699	0,001765	0,001963
Mn	0,000174	0,000174	0,000175	0,000177	0,000181	0,000186	0,000206
Pb	0,000566	0,000566	0,000566	0,000566	0,000566	0,000566	0,000566
P	—	0,000002	0,000005	0,000008	0,000016	0,000032	0,000080
Cl	—	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000001	0,000002

Таблиця 2. Елементний склад бетону з баритом і базальтовою фіброю

Елемент	Дозування базальтової фібри, кг/м <sup>3</sup>						
	0	1	3	5	10	20	50
H	0,010454	0,010454	0,010448	0,010441	0,010425	0,010392	0,010295
O	0,392854	0,393042	0,392981	0,392915	0,392756	0,392439	0,391487
C	0,000597	0,000596	0,000594	0,000591	0,000584	0,000570	0,000528
Na	0,003030	0,003043	0,003054	0,003067	0,003098	0,003158	0,003341
Al	0,013759	0,013793	0,013830	0,013872	0,013971	0,014170	0,014765
Si	0,094503	0,094597	0,094491	0,094374	0,094096	0,093541	0,091873
K	0,002064	0,002069	0,002072	0,002074	0,002080	0,002092	0,002127
Ca	0,140298	0,140322	0,140360	0,140401	0,140500	0,140697	0,14129
Fe	0,008429	0,008458	0,008504	0,008555	0,008675	0,008916	0,009640
Mg	0,005202	0,005213	0,005236	0,005261	0,005320	0,005439	0,005797
S	0,061877	0,061877	0,061877	0,061878	0,061878	0,061880	0,061885
Ti	—	0,000007	0,000019	0,000033	0,000066	0,000132	0,000330
Mn	—	0,000001	0,000002	0,000005	0,000006	0,000013	0,000032
P	—	0,000002	0,000005	0,000008	0,000016	0,000032	0,000080
Cl	—	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000001	0,000002
Ba	0,265522	0,265522	0,265522	0,265522	0,265522	0,265522	0,265522

треба забезпечити міцність і захисні властивості бетону протягом 100 років. Щоб підвищити захисні властивості бетону, в нього додають спеціальні агрегати, що зменшують проникність гамма- та нейтронного випромінювання крізь бетон [16].

У статті наведено результати досліджень зміни захисних властивостей надміцного бетону [17] двох видів:

- а) бетону зі звичайним щебенем (далі — БЩ);
- б) бетону з баритом (BaSO<sub>4</sub>) (далі — ББа).

Прийняті для моделювання дані: густина звичайного щебеню — 2,6 г/см<sup>3</sup>; густина агрегату з бариту — 4,0 г/см<sup>3</sup>; склад бетону БЩ без фібри в масових частках: цемент — 0,289; вода — 0,081; пісок — 0,178; агрегат — 0,451; використано портландцемент М600 [17].

Отже, моделювалися дві різні бетонні суміші — зі звичайним щебенем та з різним дозуванням базальтової фібри: 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 кг/м<sup>3</sup>. Елементний склад бетону (в масових частках) із щебенем для дозувань базальтової фібри 1, 3, 5, 10, 20, 50 кг/м<sup>3</sup> та без фібри (0 кг) наведено в табл. 1, а елементний склад бетону з баритом для таких самих дозувань базальтової фібри та без фібри — у табл. 2.

### Теорія та методи моделювання

**WinXCom.** Дані щодо поглинання рентгенівського та гамма-випромінювання різними матеріалами необхідні для застосування в науковій, медичній та промислових сферах. Мікроперерізи взаємодії, параметри згасання гамма-випромінювання для різних елементів і сполук та сумішей наведені в табличному вигляді у [18, 19]. Berger та Hubbell

у 1990-х роках розробили засноване на веб-технології програмне забезпечення під назвою XCOM [20], яке обчислює параметри згасання або мікроперерізи взаємодії фотонів з будь-яким елементом, сполукою або сумішшю в інтервалі енергій від 1 кеВ до 100 ГеВ. XCOM значно заощаджує час на обчислення вказаних параметрів традиційним способом. Пізніше програмне забезпечення XCOM було модернізовано в програму WinXCom [21, 22], що працює в операційній системі Windows і має додаткові функції. Програмне забезпечення WinXCom спроможне генерувати перерізи й параметри згасання для апроксимаційних та логарифмічних енергетичних сіток у стандартах XCOM. До того ж, користувач сам може задати власну енергетичну сітку. Обидві програми (XCOM та WinXCom) є дуже зручними альтернативами традиційним «ручним» розрахункам з отримання сумарних перерізів, параметрів згасання, а також парціальних перерізів для різних процесів взаємодії, таких як некогерентне і когерентне розсіювання, фотоелектричне поглинання та генерація пар для обраних елементів, сполук та сумішей. Обидві програми потребують введення масових часток складових елементів об'єкта, що досліджується.

**Теорія обчислення параметрів згасання гамма-випромінювання.** Середній атомний номер  $\langle Z \rangle$  (mean atomic number) та середня атомна маса  $\langle A \rangle$  (mean atomic mass) розраховуються так:

$$Z = \sum_i f_i Z_i, A = \sum_i f_i A_i,$$

де  $f_i$  — молярна частка  $i$ -го компонента суміші;  $Z_i$  — атомний номер  $i$ -го компонента суміші;  $A_i$  — атомна маса  $i$ -го компонента суміші.

Середня концентрація електронів  $N_e$  (mean electron density), [електрон/см<sup>3</sup>],

$$N_e = N_A \frac{\sum_i f_i Z_i}{\sum_i f_i A_i} = N_A \frac{Z}{A},$$

де  $N_A$  — число Авогадро.

Масовий коефіцієнт згасання [23] радіоактивного випромінювання в бетоні

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_m = \sum_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i,$$

де  $(\mu/\rho)_i$  — масовий коефіцієнт згасання в  $i$ -му компоненті суміші;  $\mu$  — коефіцієнт згасання  $i$ -го компонента суміші;  $\rho$  — густина  $i$ -го компонента суміші;  $w_i = \frac{n_i A_i}{\sum_i w_i A_i}$  — масова частка  $i$ -го компонента суміші;  $n_i$  — кількість елементів у суміші (кількість членів у формулі).

Переріз взаємодії фотонів для  $i$ -го компонента

$$\sigma_i = \frac{A_i}{N_A} \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i.$$

Сумарний переріз взаємодії фотонів для композитного матеріалу

$$\sigma_m = \frac{M}{N_A} \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_m,$$

де  $M = \sum_i n_i A_i$  — молярна маса всього композитного матеріалу.

Ефективний атомний переріз

$$\sigma = \frac{1}{N_A} \sum_i f_i A_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i,$$

ефективний електронний переріз

$$\sigma_e = \frac{1}{N_A} \sum_i \frac{f_i A_i}{Z_i} \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i,$$

де  $f_i = n_i / \sum_i n_i$  — частка атомів  $i$ -го компонента суміші;  $\sum_i f_i = 1$ ;  $Z_i$  — атомний номер.

Ефективний електронний переріз пов'язаний з ефективним атомним перерізом співвідношенням  $\sigma_e = \frac{\sigma_a}{Z_{eff}}$ .

Відповідно ефективний атомний номер у загальному вигляді

$$Z_{eff} = \frac{\sigma_a}{\sigma_e}.$$

Але, як зазначено в [24–26], більшість дослідників обчислює ефективний атомний номер за формулою

$$Z_{PI,eff} = \frac{\sum_i f_i A_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i}{\sum_j \frac{f_j A_j}{Z_j} \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_j},$$

де  $Z_{PI,eff}$  — ефективний атомний номер для взаємодії фотонів (PI — photon interaction), і саме ця формула використовується в коді WinXCom. За допомогою коду WinXCom можна отримати: 1) середнє значення  $Z_{PI,eff}$  для всього заданого енергетичного спектра та 2) мінімальні й максимальні значення  $Z_{PI,eff}$  у заданому інтервалі енергій. Ці значення обчислені та наведені далі в представленій статті.

Ефективна електронна густина

$$N_{eff} = \frac{N_A}{M} Z_{eff} \sum_i n_i = \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_m.$$

У роботі [27] запропоновано визначити ефективний атомний номер для процесів фотопоглинання за емпіричним рівнянням

$$Z_{M,eff} = \left(\sum_i W_i Z_i^{3.1}\right)^{1/3.1},$$

де  $W_i$  — масові частки окремих елементів суміші;  $Z_i$  — атомні номери.

Автори статті використали обидва наведені методи для отримання ефективного атомного номера ( $Z_{M,eff}$  та  $Z_{PI,eff}$ ) і порівняли отримані результати.

### Результати розрахунків

Для кожної композиції бетонів БЩ і ББа у відповідності з даними табл. 1 і 2 за допомогою програми WinXCom отримано параметри згасання гамма-випромінювання у заданих енергетичних інтервалах від 1 кеВ до 100 ГеВ. Ці дані використано для розрахунку середнього атомного номера  $Z$ , середньої атомної маси  $A$ , максимальних та мінімальних значень ефективного атомного номера ( $Z_{eff}^{max}$  та  $Z_{eff}^{min}$ ), максимальних та мінімальних значень ефективної електронної густини ( $N_{eff}^{max}$  та  $N_{eff}^{min}$ ).

Отримані результати наведено в табл. 3, 4, де через  $Z_{M,eff}$  позначено ефективний атомний номер за емпіричною формулою з [27], а через  $Z_{PI,eff}$  — за даними [24–26]. Спочатку розраховано величину  $Z_{PI,eff}$  для кожного дискретного значення енергії в діапазоні від 1 кеВ до 100 ГеВ, далі знайдено середнє значення  $Z_{PI,eff}$  для всього енергетичного діапазону (графа 6 в табл. 3 і 4), потім — максимальні й мінімальні значення  $Z_{PI,eff}$  для вибраного діапазону енергії (графи 7 і 8).

Залежності середнього атомного номера від кількості базальтової фібри для БЩ і ББа та залежності розподілу ефективного атомного номера від енергії по обох типах бетонів показано на рис. 2–4.

Із порівняння результатів, наведених в табл. 3, 4 і на рис. 2–4, випливає, що захисні властивості ББа кращі, ніж БЩ, що пояснюється більшою густиною і більшим атомним номером агрегату в ББа. Результатом додавання базальтової фібри в бетон є покращення (шоправда, не суттєве) важливих характеристик (середня атомна маса, середній атомний номер, ефективний атомний номер та середня густина електронів).

Найбільш важливими для визначення параметрів згасання гамма-випромінювання є фотоелектричне поглинання і гнучке та негнучке розсіяння в матеріалі [16].

Таблиця 3. Результати розрахунків основних показників згасання гамма-випромінювання у БЩ, армованому базальтовою фіброю

Дозування фібри, кг/м <sup>3</sup>	A	Z	Середня електронна густина	Z <sub>M,eff</sub>	Z <sub>PI,eff</sub>	Z <sub>PI,eff</sub>		N <sub>eff</sub>	
						Max	Min	Max	Min
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	17,289	8,696	3,02886	14,903	14,647	16,367	7,463	5,7010	2,5995
1	17,290	8,696	3,02884	14,904	14,648	16,369	7,464	5,7011	2,5996
3	17,293	8,697	3,02880	14,906	14,650	16,316	7,462	5,6818	2,5985
10	17,302	8,702	3,02866	14,912	14,656	16,309	7,467	5,6761	2,5987
20	17,317	8,708	3,02846	14,921	14,665	16,321	7,474	5,6757	2,5992
50	17,358	8,728	3,02787	14,947	14,692	16,356	7,497	5,6789	2,6028

Таблиця 4. Результати розрахунків основних показників згасання гамма-випромінювання в ББа, армованому базальтовою фіброю

Дозування фібри, кг/м <sup>3</sup>	A	Z	Середня електронна густина	Z <sub>M,eff</sub>	Z <sub>PI,eff</sub>	Z <sub>PI,eff</sub>		N <sub>eff</sub>	
						Max	Min	Max	Min
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	21,354	10,242	2,88831	36,9626	36,2319	42,311	8,403	11,9321	2,3698
1	21,354	10,242	2,88835	36,9629	36,2323	42,307	8,404	11,9311	2,3700
3	21,358	10,244	2,88831	36,9632	36,2326	42,308	8,406	11,9290	2,3701
10	21,372	10,250	2,88818	36,9640	36,2335	42,311	8,413	11,9219	2,3705
20	21,393	10,259	2,88799	36,9651	36,2349	42,316	8,423	11,9118	2,3710
50	21,455	10,287	2,88742	36,9687	36,2390	42,329	8,453	11,8927	2,3750

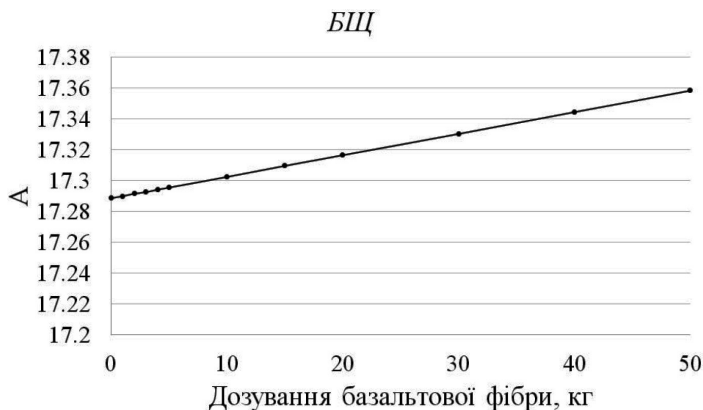


Рис. 2. Залежність середнього атомного номера від дозування базальтової фібри для БЩ



Рис. 3. Залежність середнього атомного номера від дозування базальтової фібри для ББа

Поглинання гамма-випромінювання є результатом взаємодії фотонів з електронами в дослідженому матеріалі. Згідно із законом Beer—Lambert, поглинута інтенсивність фотонів пропорційна шляху, пройденому в матеріалі. Також відомо, що коефіцієнт лінійного згасання залежить від атомної густини матеріалу та перерізу поглинання фотонів. Для визначення параметрів згасання гамма-випромінювання під час проходження крізь бетон треба враховувати процеси згасання в усіх компонентах бетону та доданий базальтовій фібрі.

Зміна масових часток компонентів бетону з додаванням різної кількості базальтової фібри змінює елементний склад, зокрема в бетоні БЩ кількість атомів Na (Z = 11), Al (Z = 13), K (Z = 19), Ca (Z = 20), Fe (Z = 26), Mg (Z = 12), S (Z = 16), Ti (Z = 22), Mn (Z = 25), P (Z = 15), Cl (Z = 17)

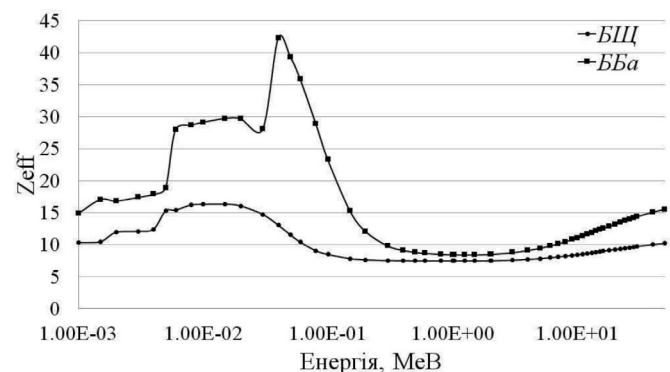


Рис. 4. Залежність ефективного атомного номера від енергії для обох типів бетонів (БЩ та ББа)

збільшується, а кількість атомів Н ( $Z = 1$ ), О ( $Z = 8$ ), С ( $Z = 6$ ), Si ( $Z = 14$ ) зменшується.

Оскільки базальтова фібра замінює пісок у бетонній суміші, а до складу базальтової фібри входить більше важких елементів, ніж до складу піску, то згасання гамма-випромінювання у запропонованому композитному матеріалі збільшується.

Наведений аналіз елементного складу узгоджується з попередніми дослідженнями [16, 28]. Крім того,  $Z_{eff}$  та  $N_{eff}$  мають чітку енергетичну залежність у діапазоні комптонівського розсіювання (0,1–1 МеВ).

## Висновки

Досліджено параметри згасання гамма-випромінювання у бетонах, армованих базальтовою фіброю: обчислено основні параметри згасання гамма-випромінювання та виконано моделювання проходження гамма-випромінювання в запропонованому композитному матеріалі за допомогою коду WinXCom.

Показано, що параметри згасання гамма-випромінювання збільшуються з додаванням базальтової фібри. Отримані результати продемонстрували, що для значного збільшення параметрів згасання гамма-випромінювання у фібробетон потрібно додавати важкий агрегат, наприклад барит.

Новий запропонований композитний матеріал на основі бетону та базальтової фібри має значний потенціал для застосування в атомній енергетиці. Додавання базальтової фібри в бетон, по-перше, покращує механічні характеристики бетону (міцність на стискання, міцність на розрив при згинанні тощо); по-друге, зменшує кількість та величину мікротріщин, що дасть змогу значно збільшити період експлуатації бетону; по-третє, збільшує згасання гамма-випромінювання у такому бетоні.

## Список використаної літератури

- Naus, D. J. (2007), "Primer on Durability of Nuclear Power Plant Reinforced Concrete Structures — A Review of Pertinent Factors", NUREG/CR-6927, ORNL/ TM-2006/529. Oak Ridge National Laboratory, U.S. Nuclear Regulatory Commission, USA, 112 p.
- Abrishambag, A., Barros, J.A.O., Cunha, V.M.C.F. (2013), "Relation between fiber distribution and post-cracking behaviors in steel fiber reinforced self-compacting concrete panels", *Cement and Concrete Research*, No. 51, pp. 57–66.
- Graeff, A. G., Pilakoutas, K., Neocleous, K., Peres, N. M. M. (2012), "Fatigue resistance and cracking mechanism of concrete pavements reinforced with recycled steel fibers recovered from post-consumer types", *Engineering Structures*, No. 45, pp. 386–395.
- Haddad, R.H., Smadi, M. M. (2004), "Role of fibers in controlling unrestrained expansion and arresting cracking in Portland cement concrete undergoing alkali-silica reaction", *Cement and Concrete Research*, No. 34 (1), pp. 103–108.
- Banthia, N., Azzabi, M., Pigeon, M. (1993), "Restrained shrinkage cracking in fiber reinforced cementitious composites", *Materials and Structures*, No. 26 (7), pp. 405–413.
- Барашиков А. Я., Мельник В. К., Рябенко Т. А. Вплив матеріалу фібри на експлуатаційні властивості фібробетонів. *Промислове будівництво та інженерні споруди*. 2012. № 4. С. 41–44.
- Джигирис Д. Д., Махова М. Ф. Основы производства базальтовых волокон и изделий. М. : Каменный век, 2012. 416 с.
- Swink, M. (2002), Continuous filament basalt. A unique fiber capable of leadership in high temperature applications. In: *Proceeding of Techtexil North America Symposium*, Atlanta, GA, USA.
- Branston, J., Das, S., Kenno, S., Taylor, C. (2016), "Influence of basalt fibres on free and restrained plastic shrinkage", *Cement and Concrete Composites*, No. 74, pp. 182–190.
- Branston, J., Das, S., Kenno, S., Taylor, C. (2016), "Mechanical behaviour of basalt fibre reinforced concrete", *Construction and Building Materials*, No. 124, pp. 878–886.
- Zorla, E., Irbьker, C., Gulik, V., Kovaljov, S., Kiisa, M., Biland, A., Tkaczyk, A. H. (2016), "Optimization of basalt fiber in concrete composite for industrial application in Estonia", *Fresenius Environ. Bulletin*, No. 25 (1), pp. 355–364.
- Irbьker, 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.
- Zorla, E., Irbьker, C., Biland, 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.
- Basalt Fiber. URL: <http://technobasalt.com>
- Gulik, V. I., Biland, A. B. The Use of Basalt, Basalt Fibers and Modified Graphite for Nuclear Waste Repository: *Proceedings of International Waste Management Conference. (WM2012)*, Phoenix, Arizona, US: 26 February — 1 March, 2012. URL: <http://www.wmsym.org/archives/2012/papers/12150.pdf>
- Kaplan, M. F. (1989), *Concrete Radiation Shielding*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 448 p.
- Бердичевский Г. И., Васильев А. П., Иванов Ф. М. *Справочник по производству сборных железобетонных изделий / Под ред. Михайлова К. В., Фоломеева А. А. М. : Стройиздат, 1982. 440 с.*
- Hubbell, J. H., Seltzer, S. M. (1995), "Tables of X-ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients 1 keV to 20 MeV for Elements  $Z = 1-92$  and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest", NISTIR-5632, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg.
- Hubbell, J. H., Seltzer, S. M. (2004), "Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients (Version 1.4)", National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- Berger, M. J., Hubbell, J. H. (1987/1999) XCOM: Photon Cross-sections Database, Web Version 1.2. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD20899, USA/ Originally published as NBSIR 87-3597 "XCOM: Photon Cross Sections on a Personal Computer. URL: <http://physics.nist.gov/xcom>
- Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K. B., Levring, H. (2001). "X-ray absorption in matter. Reengineering XCOM", *Radiation Physics and Chemistry*, No. 60, pp. 23–24.
- Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K.B., Levring, H. (2004) "WinXCom — a program for calculating X-ray attenuation coefficients", *Radiation Physics and Chemistry*, No. 71, pp. 653–654.
- Jackson, D. F., Hawkes, D. J. (1981), "X-ray attenuation coefficients of elements and mixtures", *Physics Reports*, No. 70, pp. 169–233.
- 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.
- Manohara, S.R., Hanagodimath, S.M., Thind, K.S., Gerward, L. (2010), "The effective atomic number revisited in the light of modern photon-interaction cross section databases", *Applied Radiation and Isotopes*, No. 68, pp. 784–787.
- Singh, K., Singh, H., Sharma, G., Gerward, L., Khanna, A., Kumar, R., Nathuram, R., Sahota H.S. (2005), "Gamma-ray shielding properties of CaO-SrO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glasses", *Radiation Physics and Chemistry*, No. 72 (2–3), pp. 225–228.
- Murty, R. C. (1965). "Effective atomic numbers", *Nature*, No. 207, pp. 398–399.
- Shultis, J. K., Faw, R. E. (1996), "Radiation Shielding", Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ / Republished in 2000 under same title by the American Nuclear Society.

## References

1. Naus, D. J. (2007), "Primer on Durability of Nuclear Power Plant Reinforced Concrete Structures — A Review of Pertinent Factors", NUREG/CR-6927, ORNL/ TM-2006/529, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Nuclear Regulatory Commission, USA, 112 p.
2. Abrishambag, A., Barros, J. A. O., Cunha, V. M. C. F. (2013), "Relation Between Fiber Distribution and Post-Cracking Behaviors in Steel Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete Panels", *Cement and Concrete Research*, No. 51, pp. 57–66.
3. Graeff, A. G., Pilakoutas, K., Neocleous, K., Peres, N. M. M. (2012), "Fatigue Resistance and Cracking Mechanism of Concrete Pavements Reinforced with Recycled Steel Fibers Recovered From Post-Consumer Types", *Engineering Structures*, No. 45, pp. 386–395.
4. Haddad, R. H., Smadi, M. M. (2004), "Role of Fibers in Controlling Unrestrained Expansion and Arresting Cracking in Portland Cement Concrete Undergoing Alkali-Silica Reaction", *Cement and Concrete Research*, No. 34 (1), pp. 103–108.
5. Banthia, N., Azzabi, M., Pigeon, M. (1993), "Restrained Shrinkage Cracking in Fiber Reinforced Cementitious Composites", *Materials and Structures*, No. 26 (7), pp. 405–413.
6. Barashikov, A. Ya., Melnik, V. K., Riabenko, T. A. (2012), "Impact of Fiber Material on Operational Properties of Fibrous Concrete" [Vplyv material fibry na ekspluatatsiini vlasty—44. (Ukr)]
7. Dzhigiris, D. D., Makhova, M. F. (2012), "Foundations of Producing Basalt Fibre" [Osnovy proizvodstva bazaltovykh volokon i izdelii], Moscow, Kamennyi Vek, 416 p. (Rus)
8. Swink, M. (2002), "Continuous Filament Basalt. A Unique Fiber Capable of Leadership in High Temperature Applications", *Proceeding of Techtextil North America Symposium*, Atlanta, GA, USA.
9. Branston, J., Das, S., Kenno, S., Taylor, C. (2016), "Influence of Basalt Fibres on Free and Restrained Plastic Shrinkage", *Cement and Concrete Composites*, No. 74, pp. 182–190.
10. Branston, J., Das, S., Kenno, S., Taylor, C. (2016), "Mechanical Behaviour of Basalt Fibre Reinforced Concrete", *Construction and Building Materials*, No. 124, pp. 878–886.
11. Zorla, E., Ipbøker, C., Gulik, V., Kovaljov, S., Kiisa, M., Biland, A., Tkaczyk, A. H. (2016), "Optimization of Basalt Fiber in Concrete Composite for Industrial Application in Estonia", *Fresenius Environ. Bulletin*, No. 25 (1), pp. 355–364.
12. Ipbøker, 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.
13. Zorla, E., Ipbøker, C., Biland, 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. Basalt Fiber, URL: <http://technobasalt.com>
15. Gulik, V. I., Biland, A. B. (2012), "The Use of Basalt, Basalt Fibers and Modified Graphite for Nuclear Waste Repository: Proceedings of International Waste Management Conference", (WM2012), Phoenix, Arizona, 26 February — 1 March, 2012, URL: <http://www.wmsym.org/archives/2012/papers/12150.pdf>
16. Kaplan, M. F. (1989), "Concrete Radiation Shielding", John Wiley & Sons, Inc., New York, 448 p.
17. Berdichevskii, G. I., Vasiliev, A. P., Ivanov, F. M. (1982), "Manual on Production of Prefabricated Reinforced Concrete Products" [Spravochnik po proizvodstvu sbornykh zhelezobetonnykh izdelii], Moscow, 440 p. (Rus)
18. Hubbell, J. H., Seltzer, S. M. (1995), "Tables of X-ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1–92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest", NISTIR-5632, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg.
19. Hubbell, J. H., Seltzer, S. M. (2004), "Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients (Version 1.4)", National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
20. Berger, M. J., Hubbell, J. H. (1987/1999) "XCOM: Photon Cross-Sections Database, Web Version 1.2. National Institute of Standards and Technology", Gaithersburg, MD20899, USA, Originally published as NBSIR 87–3597 "XCOM: Photon Cross Sections on a Personal Computer", URL: <http://physics.nist.gov/xcom>
21. Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K.B., Levring, H. (2001), "X-Ray Absorption in Matter. Reengineering XCOM", *Radiation Physics and Chemistry*, No. 60, pp. 23–24.
22. Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K. B., Levring, H. (2004) "WinXCom — a Program for Calculating X-ray Attenuation Coefficients", *Radiation Physics and Chemistry*, No. 71, pp. 653–654.
23. Jackson, D.F., Hawkes, D.J. (1981), "X-ray Attenuation Coefficients of Elements and Mixtures", *Physics Reports*, No. 70, pp. 169–233.
24. 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
25. Manohara, S. R., Hanagodimath, S. M., Thind, K. S., Gerward, L. (2010), "The Effective Atomic Number Revisited in the Light of Modern Photon-Interaction Cross Section Databases", *Applied Radiation and Isotopes*, No. 68, pp. 784–787.
26. Singh, K., Singh, H., Sharma, G., Gerward, L., Khanna, A., Kumar, R., Nathuram, R., Sahota, H. S. (2005), "Gamma-Ray Shielding Properties of CaO–SrO–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Glasses", *Radiation Physics and Chemistry*, No. 72 (2–3), pp. 225–228.
27. Murty, R. C. (1965). "Effective Atomic Numbers", *Nature*, No. 207, pp. 398–399.
28. Shultis, J. K., Faw, R. E. (1996), "Radiation Shielding", Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, Republished in 2000 by the American Nuclear Society.

Отримано 14.11.2017.