

УДК: 666.973.6

DOI: 10.20535/iwccmm2024300771

## ДИСПЕРСНО-АРМОВАНІ КОМПОЗИТИ НА ОСНОВІ НЕОРГАНІЧНИХ В'ЯЖУЧИХ З ВИСОКОЮ УДАРНОЮ МІЦНІСТЮ

**Владислав Глуховський,**  
к.т.н., доцент  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
[svscomp@ukr.net](mailto:svscomp@ukr.net)

**Ігор Глуховський,**  
к.т.н., доцент  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
[svscomp@ukr.net](mailto:svscomp@ukr.net)

**Анотація** Розвиток технологій поводження з екологічно-небезпечними та токсичними відходами передбачає реалізацію наступних цілей: - створення парку транспортно-захисних контейнерів, які забезпечують можливість контейнеризації небезпечних речовин в місцях їхнього теперішнього зберігання; - організацію безпечного транспортування небезпечних речовин; - організацію довгострокового безпечного їхнього зберігання на територіях спеціально облаштованих полігонів.

Використання у якості основного конструкційного матеріалу бетону на основі портландцементу забезпечує необхідний рівень економічної ефективності. Але низькі властивості бетонів при сприйнятті ударних та динамічних навантажень обумовлює необхідність додаткового дисперсного армування.

Метою представлених досліджень є встановлення залежності ударної міцності композицій на основі неорганічних в'язучих і мінеральних волокон від їхнього якісного і кількісного складу і умов твердіння та встановлення можливості використання цих композицій для виготовлення транспортно-захисних контейнерів.

У якості моделі для визначення напруг, які виникають у конструкційних елементах контейнера при ударних навантаженнях, обраний транспортно – захисний контейнер КТЗ-3,2 для твердих радіоактивних відходів та методика випробування контейнера в аварійних умовах експлуатації.

**Ключові слова:** дисперсно-армовані композити, скляне волокно, скляні базальтові стрижні, питома робота руйнування, міцність при ударному навантаженні, транспортно – захисний контейнер.

**Abstract:** The development of technologies for handling environmentally hazardous and toxic waste involves the realization of the following goals: - creation of a fleet of transport-protective containers that provide the possibility of containerization of hazardous substances in their current storage locations; - organization of safe transportation of dangerous substances; - the organization of their long-term safe storage in the territories of specially equipped landfills.

The use of Portland cement-based concrete as the main structural material ensures the necessary level of economic efficiency. But the low properties of concrete in the perception of impact and dynamic loads determine the need for additional dispersed reinforcement.

The purpose of the presented research is to establish the dependence of the impact strength of compositions based on inorganic binders and mineral fibers on their qualitative and quantitative composition and hardening conditions, and to establish the possibility of using these compositions for the manufacture of protective transport containers.

У якості моделі для визначення напруг, які виникають у конструкційних елементах контейнера при ударних навантаженнях, обраний транспортно – захисний контейнер КТЗ-3,2 для твердих радіоактивних відходів та методика випробування контейнера в аварійних умовах експлуатації.

**Key words:** dispersion-reinforced composites, glass fiber, glass rods, specific work of destruction, strength under impact load, transport - protective container.

Аналіз технічних вимог, що висуваються до залізобетонних транспортно-захисних контейнерів для радіоактивних відходів, показує, що найскладнішим видом випробувань цього виду виробів є випробування контейнера на вільне падіння [1, 2].

Традиційно вироби із залізобетону не призначені для сприйняття ударних та динамічних навантажень, що зумовило необхідність створення залізобетонних виробів з комбінованим армуванням, у яких до складу бетону вводиться дисперсний армуючий компонент з метою збільшення ударної (динамічної) міцності та тріщиностійкості.

Властивості дисперсно-армованих композитів на основі неорганічних в'язучих та тонких мінеральних волокон або склоцементних композиційних матеріалів залежать від складу компонентів, марки цементу, водоцементного відношення, щільності цементної матриці, виду та складу волокна, їхньої орієнтації і рівномірності розподілу в об'ємі, технологій виробництва та умов експлуатації виробів.

Композиції на основі портландцементу і мінеральних волокон через один рік після виготовлення характеризуються міцністю при розтягненні в межах 9-65 МПа при об'ємному змісті волокна до 10%. Зі збільшенням кількості волокна до 20% міцність при розтяганні може досягати 123 МПа. Склоцементні матеріали характеризуються також високим опором ударним навантаженням, що є наслідком високої тріщиностійкості і наявності в'язкого характеру руйнування при усіх видах напруженого стану [3].

Бетон, який представляє собою гетерогенний матеріал, характеризується наявністю таких структурних параметрів як технологічні тріщини та залишкові деформації, які виникають у період отримання самого матеріалу при формуванні та подальшому твердненні. У зв'язку з чим, основною причиною руйнування

таких матеріалів під дією удару є незворотне зростання технологічних тріщин до тріщин руйнування або магістральних. У зв'язку з чим, вирішення проблеми підвищення ударної стійкості бетонів з урахуванням несприятливого впливу навколишнього середовища є виправданим та практично необхідним. [4].

Результати дослідження особливостей утворення і розвитку тріщин у композиційних матеріалах на основі неорганічних в'язучих та мінеральних волокон показали, що незалежно від об'ємного змісту волокна у вивчених межах (1,2...2,8%) перші тріщини шириною 3 - 5 мкм утворюються при значенні відносної деформації на рівні  $25 - 30 \cdot 10^{-5}$ , а максимальне значення ширини розкриття тріщини складає 30-50 мкм [5, 6].

В якості об'єктів дослідження були використані композиції на основі портландцементу та мінеральних волокон двох видів. У першому випадку були використані традиційні скляні волокна алюмоборосилікатного складу (товщиною 10...12 мкм) та лугостійкого складу (товщиною 12...15 мкм) які відрізняються високим початковим рівнем міцності. У другому випадку були використані скляні базальтові стрижні товщиною до 1 мм, початковий рівень міцності яких відповідає рівню міцності масивного скла.

У разі використання скляних волокон міцність композицій на їх основі зменшується на початковому етапі твердіння, що є наслідком інтенсивної хімічної взаємодії агресивних новоутворень в'язучого з поверхнею армуючого компонента [3, 5, 6].

У разі використання потовщених скляних стрижнів, міцність яких практично не змінюється зі збільшенням кількості дефектів на їх поверхні, міцність композицій на їх основі зростає зі зростанням інтенсивності процесів взаємодії в зоні контакту матриці та армуючого компонента, що, за певних умов, дозволяє отримувати композиції з кінцевим рівнем міцності при згині 60 - 70 МПа [7, 8].

Міцність досліджуваних композицій при ударних (динамічних) навантаженнях визначалася відповідно до методики [9] на копрі У-1А і розраховувалася за величиною питомої роботи руйнування бетону (А) на

підставі залежності, що визначає взаємозв'язок потенційної енергії деформацій ( $U_d$ ) та міцності матеріалу при динамічних навантаженнях ( $R_d$ ), встановлених для випадку вільного падіння стрижня з площею поперечного перерізу  $F$  і довжиною  $L$  на жорстку плиту:  $R_d = (6 \cdot A \cdot E_0)^{1/2}$ .

Аналіз результатів дослідження ударної міцності композицій (табл. 1) показує, що при твердінні композицій на основі цементного каменю в нормальних умовах протягом 28 діб використання армуючого компонента у вигляді скловолокна алюмоборосилікатного складу призводить до збільшення питомої роботи руйнування (далі ПРР) композиції у 2,3; 4,0; 5,7; 8,7 та 9,7 рази при відсотку армування 0,5; 1; 2; 3 та 4 % відповідно.

Композиції, виготовлені з використанням у якості армуючого компоненту скловолокна лугостійкого складу, характеризуються максимальним значенням ПРР - 36400 кДж/м<sup>3</sup>, що є наслідком підвищеної стійкості даних волокон у твердіючому цементі. У цьому разі, перевищення ПРР проти аналогічної характеристикою неармованого каменю становить 21,7 разів, що є максимальним показником для досліджуваного у роботі діапазону.

Таблиця 1 - Питома робота руйнування досліджуваних композицій на основі цементного каменю та цементно-піщаного розчину

Армуючий компонент	% армування	Питома робота руйнування, кДж/м <sup>3</sup> , композицій на основі			
		цементного каменю після		піщаного розчину після	
		тверднення у нормальних умовах 28 діб	пропарювання при 95 <sup>0</sup> С 8 годин	тверднення у нормальних умовах 28 діб	пропарювання при 95 <sup>0</sup> С 8 годин
Відсутній	0	1680	1680	2800	2800
Скловолокно алюмоборо-силікатного складу (АБС)	0,5	3920	1680	3360	2800
	1	6720	2240	3920	2800
	2	9520	2800	4360	2800
	3	14560	3360	6720	3360
	4	16200	3920	10640	3920
Скловолокно лугостійкого складу (ЛСС)	3	36400	5040	14000	6720
Скляні базальтові стрижні (БАЗ)	1	3920	5200	7560	6440
	3	5880	6720	11480	7840
	5	7560	8680	22680	10640

Використання у якості армуючого компонента скляних базальтових стрижнів призводить до підвищення ПРР композицій в 2,3 - 4,5 рази в порівнянні з неармованим цементним каменем. При цьому збільшення ПРР, як і у разі використання волокон алюмоборосилікатного складу, пропорційно кількості армуючого компонента в досліджуваних композиціях.

Пропарювання досліджуваних композицій призводить до зниження величини ПРР композицій, армованих скловолокном алюмоборосилікатного та лугостійкого складів. Так, у композицій, армованих 3% алюмоборосилікатного скла ПРР знижується з 14560 кДж/м<sup>3</sup> при нормальному твердненні до 3360 кДж/м<sup>3</sup> після пропарювання. Аналогічно, значення ПРР для композицій на основі лугостійкого скла знижується з 36400 кДж/м<sup>3</sup> при нормальному твердненні до 5040 кДж/м<sup>3</sup> після пропарювання. Таке зниження є наслідком збільшення швидкості корозії тонких скляних волокон у середовищі цементу, що твердіє при підвищених температурах.

У той же час, незважаючи на прискорення корозійних процесів армуючого компонента при пропарюванні, кінцевий рівень ПРР після пропарювання у армованих волоконном композицій залишається вищим за аналогічний показник цементного каменю. Так, значення ПРР композицій, армованих 1, 2, 3 і 4% алюмоборосилікатного волокна в 1,3 - 2,3 рази вищий ніж у цементного неармованого каменю. І лише при введення до складу композиції 0,5% волокон значення ПРР залишається рівним аналогічному показнику цементного каменю. Питома робота руйнування пропарених композицій, виготовлених із використанням лугостійких волокон, перевищує величину ПРР цементного каменю в 3 рази.

Порівняння значень питомої роботи руйнування у випадку використання у якості армуючого компонента скляних базальтових стрижнів діаметром до 1 мм показує, що пропарювання призводить до зростання досліджуваного показника. Так, при 1% армування значення ПРР пропарених композицій перевищує аналогічний показник для композицій, що тверділи у нормальних умовах у 1,3

рази. Відповідно, для композицій, армованих 3 та 5% базальтових стрижнів це перевищення становить 1,2 рази.

Підвищення питомої роботи руйнування після пропарювання під час використання базальтових стрижнів є наслідком двох причин.

Перша причина – відсутність залежності міцності масивного скла від стану поверхні, що на відміну від тонких скляних волокон забезпечує незмінність їх фізико-механічних характеристик у лужному середовищі твердіючого цементу. Другою причиною зростання ПРР при використанні базальтових стрижнів є зміцнення зони контакту армуючого компонента і матриці в результаті збільшення інтенсивності хімічної взаємодії поверхні скла з новоутвореннями в'язучого при підвищених температурах [10, 11, 12].

Введення до складу цементного каменю дрібного заповнювача призводить до збільшення ПРР матеріалу матриці як у разі твердіння у нормальних умовах, так і при пропарюванні. Таке збільшення є наслідком зниження усадкових деформацій цементного каменю при введенні до його складу інертних заповнювачів.

У разі твердіння композицій на основі цементно-піщаного розчину в нормальних умовах описані вище залежності росту ПРР зі збільшенням відсотка армування зберігаються, як при використанні скляних волокон алюмоборосилікатного та лугостійкого складу, так і при використанні базальтових стрижнів.

При цьому ПРР армованих композицій на основі алюмоборосилікатного волокна вищий за аналогічний показник неармованого матеріалу матриці в 3,8 рази при максимальному відсотку армування (4%). Введення до складу композиції лугостійкого волокна дозволяє підвищити ПРР у 5,0 разів. Введення 5% базальтових стрижнів супроводжується зростанням ПРР у 8,1 разів.

Пропарювання композицій на основі цементно-піщаного розчину призводить до зниження ПРР у всіх зразків, армованих скляними волокнами та базальтовими стрижнями. Причому в композиціях на основі волокон алюмоборосилікатного складу з відсотком армування від 0,5 до 2% значення

досліджуваного показника дорівнює значенню ПРР неармованого матеріалу матриці. При цьому зберігається перевищення значень ПРР у композицій, армованих лугостійким волокном порівняно з матеріалом матриці в 2,4 рази та у композицій армованих базальтовими стрижнями в 2,3-3,8 рази.

Узагальнюючи отримані результати, можна зробити висновок, що введення до складу цементного каменю і цементно-піщаного розчину дисперсного армуючого компонента в більшості розглянутих випадків сприяє збільшенню питомої роботи руйнування композицій.

Максимального ефекту при твердінні композицій у нормальних умовах вдається досягти при армуванні цементного каменю лугостійким волокном у кількості 3% та при армуванні цементно-піщаного розчину базальтовими стрижнями у кількості 5%. У цих випадках вдається підвищити значення питомої роботи руйнування композицій порівняно з неармованим матеріалом матриці у 21,7 та у 8,1 рази відповідно.

У разі пропарювання композиції максимального ефекту вдається досягти при використанні у якості армуючого компонента базальтових стрижнів. У цьому разі збільшення питомої роботи руйнування композиції проти аналогічного показника матеріалу матриці відбувається у 3,8-5,1 разів.

За результатами розрахунків встановлено, що максимальна значення напруги яка виникає у тілі залізобетонного транспортно-захисного контейнера при його вільному падінні на мішень становить 1095,0 МПа (рис. 1, 2).

Аналіз значень міцності досліджуваних композицій при ударному (динамічному) навантаженні (рис. 3) показує, що необхідним рівнем динамічної міцності, вище 1100 МПа, характеризуються композиції, що тверділи у нормальних умовах, на основі цементного каменю і скляного волокна алюмоборосилікатного складу в кількості від 1 до 4% (1135,9 - 1703,8 МПа), композиції на основі цементного каменю, армовані скляним волокном лугостійкого складу (2643,6 МПа) та композиції, армовані базальтовими стрижнями у кількості 5% (1204,9 МПа).

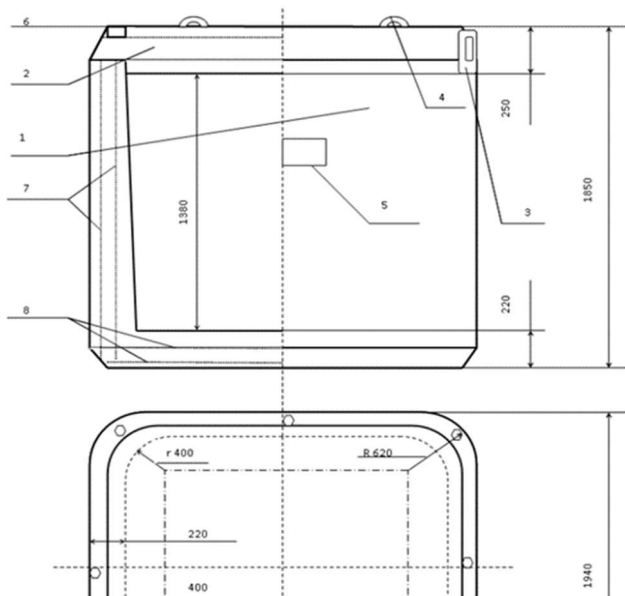


Рисунок 1 - Транспортно – захисний контейнер КТЗ-3,2 [13].

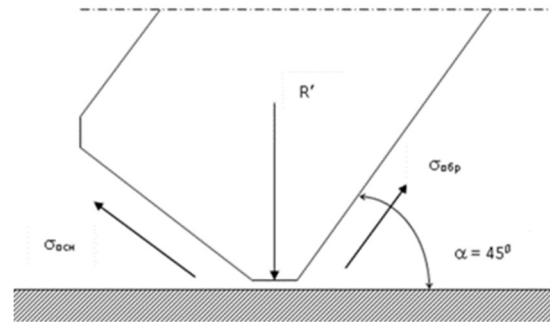


Рисунок 2 - Розрахункова схема визначення напруги уздовж грані контейнера і уздовж площини основи при вільному падінні на кут.

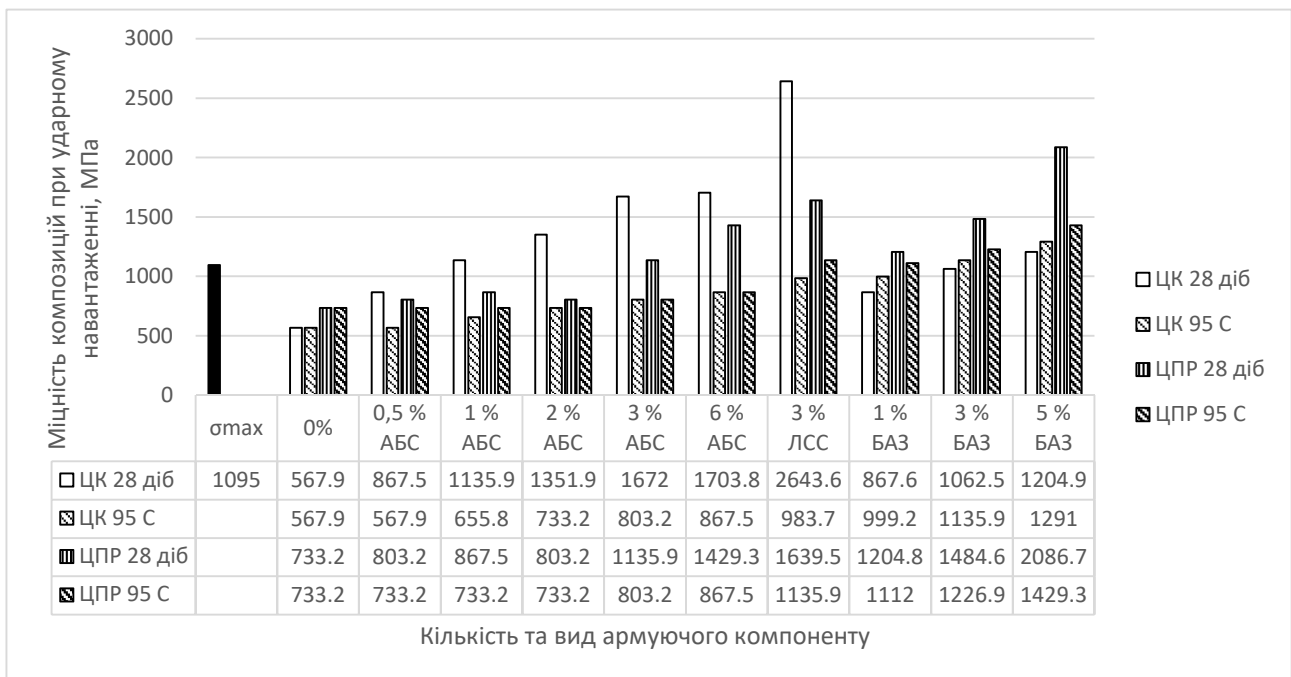


Рисунок 3 - Міцність при ударному (динамічному) навантаженні досліджуваних композицій на основі цементного каменю та цементно-піщаного розчину.

Пропарювання композицій на основі цементного каменю призводить до зниження значення міцності при ударному (динамічному) навантаженні нижче за необхідний розрахунковий рівень при їх армуванні скляним волокном алюмоборосилікатного складу (655,8 - 867,5 МПа) і лугостійкого складу (983,7 МПа). Рівень міцності при ударному (динамічному) навантаженні після пропарювання композицій, армованих базальтовими стрижнями у кількості 3 і



5% становить 1135,9 і 1291,0 МПа, відповідно, що перевищує розрахункове значення напруги, що виникає при вільному падінні контейнера.

З композицій на основі цементно-піщаного розчину які тверділи у нормальних умовах на протязі 28 діб достатнім рівнем міцності при ударному (динамічному) навантаженні характеризуються композиції, армовані 3 і 4% скляним волокном алюмоборосилікатного складу у кількості 3 і 4% (1135,9 і 1429,3 МПа), скляним волокном лугостійкого складу (1639,5 МПа) та базальтовими стрижнями у кількості від 1 до 5% (1204,8 - 2086,7 МПа).

Пропарювання композицій на основі цементно-піщаного розчину призводить до зниження рівня міцності при ударному (динамічному) навантаженні нижче за необхідний розрахунковий рівень у композицій, армованих скляним волокном алюмоборосилікатного складу (803,2 – 867,5 МПа). У композицій, армованих скляним волокном лугостійкого складу та базальтовими стрижнями кінцевий рівень міцності при ударному (динамічному) навантаженні залишається вищим за необхідне розрахункове значення і становить 1135,9 та 1112,0 – 1429,3 МПа відповідно.

## **ВИСНОВКИ**

1 З наведених композицій найбільш придатними для використання у виробництві транспортно-захисних контейнерів для екологічно-небезпечних та радіоактивних відходів є композиції на основі цементно-піщаного розчину.

2 Необхідність інтенсифікації процесів твердіння при виробництві контейнерів з метою скорочення металоємності виробництва та тривалості технологічного циклу зумовлює необхідність вибору композицій, які після пропарювання забезпечують необхідний рівень міцності при ударному (динамічному) навантаженні.

3 У якості дисперсно-армованих композитів на основі неорганічних в'язучих та мінеральних волокон для виробництва транспортно-захисних контейнерів можуть бути рекомендовані композиції на основі цементно-

піщаного розчину, армовані лугостійким скловолокном у кількості 3% та базальтовими стрижнями діаметром до 1 мм у кількості від 1 до 3%.

#### Список літератури:

- 1 НП 306.6.229-2020 Правила безпечного перевезення радіоактивних матеріалів. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1313-20#Text> (да звернення: 20.02.2024).
- 2 Сербін В.П., Глуховський В.В., Сорокін В.Т. (1993) Захоронення радіоактивних відходів. Київ: УкрНТІ, 1993. 36 с.
3. Пащенко А.А., Сербін В.П., Паславская А.П., Глуховский В.В. Бірюкович Ю.Л., Солодовнік А.Б. (1988) Армування неорганічних в'язучих речовин мінеральними волокнами, 1988.- 200с.
4. Вировий В.Н., Дорофєєв В.С., Фіц С.Б. (2004) Бетон в умовах ударної дії. Монографія. Одеса: Внешрекламсервіс, 270 с.
5. Bentur, A., Mindess. S. (2007) Fiber Reinforced Cementitious Composites, Second Edition, Taylor and Francis Group, London and New York,. 594 p.
6. Majumdar A.I., West J.M. Larner L.J. (1977) Properties of glass fibres in cement environment. J. Mater. Sci.-№5. P. 927-936.
7. Пащенко А.А., Сербін В.П., Глуховский В.В., Михайлішина Н.З. (1989) Композиційні матеріали на основі цементного каменю, армовані стержнями зі скла. Известія АН СРСР. Неорганічні матеріали.-Том 25, №6.- С.-1032-1035.
8. Глуховський В.В., Михайлішина Н.З. (2001) Залежність міцності склоцементних композицій від гідролітичного класу склоарматури. Доповіді Перших наук. читань ім. Академіка НАН А.С. Бережного “Фізико-хімічні проблеми матеріалознавства”. Харків: С. 50-51.
9. Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Е.С. Уманський (2004) Опір матеріалів: Підручник, за ред. Г.С. Писаренко. 2-ге вид., допов. і переробл. К.: Вища шк., 655 с.
10. Glukhovskiy V.V., Mikhailisina N.Z., Serbin V.P. (1992) High-strength and durable composites with non-metallic reinforcement. 9<sup>th</sup> International congress on the chemistry of cement. New Delhi, India: Vol.V.-p.-475-478.
11. Glukhovsky V.V., Biryukovich Y.L., Mikhailisina N.Z., Dashkova T.S. (1997) Peculiar features of contact zone formation between cement paste and vitreous silicate filler. 10<sup>th</sup> International congress on the chemistry of cement. Gothenburg, Sweden: Vol. 4.-4pp.
12. Glukhovsky V.V., Biryukovich Y.L. Mikhailisina N.Z., Dashkova T.S. (1997) Durability of glass fiber reinforced concrete. 13. International Baustofftagung. Weimar: P.2-0287 – 2-0295.
13. Контейнер транспортно-захисний для твердих радіоактивних відходів: патент 59479 Україна: МПК7 G 21F5/005. № 2001064284;опубл. 15.09.2003, Бюл. № 9. 5 с.