

**Глуховський В.В.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Глуховський І.В.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## УДАРОМІЦНІ ДИСПЕРСНО-АРМОВАНІ КОМПОЗИТИ НА ОСНОВІ НЕОРГАНІЧНИХ В'ЯЖУЧИХ ТА МІНЕРАЛЬНИХ ВОЛОКОН

*У статті представлені результати дослідження міцності при ударному навантаженні дисперсно-армованих композиційних матеріалів на основі неорганічних в'язучих та мінеральних волокон.*

*Стан зберігання та видалення відходів в Україні, згідно зі статистичними даними, залишається критичним, що, насамперед, обумовлено відсутністю належної інфраструктури щодо здійснення зазначених операцій поводження з відходами та відповідного фінансування. Через низький рівень використання відходів переважна більшість їх продовжує накопичуватися на територіях підприємств.*

*У даних економічних умовах України широке застосування сучасних технологій ліквідації й утилізації високотоксичних відходів малоімовірно. У зв'язку з цим основний шлях їх ізоляції від біосфери – це напрямок зберігання у системно обладнані приповерхні сховища.*

*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.*

*У якості армуючих компонентів удароміцних композицій були обрані скляні волокна алюмоборосилікатного складу (товщиною 10...12 мкм) та лугостійкого складу (товщиною 12...15 мкм), а також скляні базальтові стрижні товщиною до 1 мм.*

*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.

**Постановка проблеми.** 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 виробу 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 скляного волокна 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 наявністю в'язкого характеру руйнування при усіх видах напруженого стану.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** 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 [3].

Дисперсне армування зменшує розмір об'ємних деформацій склобетону в початковий період твердіння, причому його вплив тим більше, чим вище концентрація волокна в цементній матриці. Дослідження склобетону, що характеризується витратою цементу 433 кг/м<sup>3</sup>, В/Ц = 0,57 і часткою піску в суміші заповнювачів 0,6, встановлено, що з уведенням скловолокна в кількості 0,25; 0,5; 0,75 і 1% його деформації зсідання знижується відповідно на 14; 36; 50 і 64%.

Результати дослідження особливостей утворення і розвитку тріщин у склобетоні 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, рівній  $25\text{--}30 \cdot 10^{-5}$ , а максимальне значення ширини розкриття тріщини складає 30–50 мкм [4, 5].

**Постановка завдання.** Метою статті є дослідження з 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.

**Виклад основного матеріалу.** 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 [4, 5].

У разі використання потовщених скляних базальтових 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 межі міцності при згині 60–70 МПа [6].

Міцність досліджуваних композицій при ударних (динамічних) навантаженнях визначалася відповідно до методики [7] на копрі У-1А і розраховувалася за величиною питомої роботи руйнування бетону ( $A$ ) 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 аналогічною характеристикою неармованого каменю становить 21,7 разів, що є максимальним показником для досліджуваного у роботі діапазону.

Використання у якості армуючого компоненту скляних базальтових стрижнів призводить до підвищення ПРР композицій в 2,3–4,5 рази в порівнянні з неармованим цементним каменем. При

**Питома робота руйнування та міцність при ударному (динамічному) навантаженні досліджуваних композицій на основі цементного каменю**

Армуючий компонент	% армування	Питома робота руйнування, кДж/м <sup>3</sup> , після		Міцність композиції при ударному навантаженні, МПа, після	
		тверднення у нормальних умовах 28 діб	пропарювання при 95°C 8 годин	тверднення у нормальних умовах 28 діб	пропарювання при 95°C 8 годин
Композиції на основі цементного каменю					
Відсутній	0	1680	1680	567,9	567,9
Скловолокно алюмоборосилікатного складу	0,5	3920	1680	867,5	567,9
	1	6720	2240	1135,9	655,8
	2	9520	2800	1351,9	733,2
	3	14560	3360	1672,0	803,2
	4	16200	3920	1703,8	867,5
Скловолокно лугостійкого складу	3	36400	5040	2643,6	983,7
Скляні базальтові стрижні	1	3920	5200	867,6	999,2
	3	5880	6720	1062,5	1135,9
	5	7560	8680	1204,9	1291,0

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 волокном 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 [8, 9, 10].

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 (табл. 2).

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 роз-

глянутих 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.

Для визначення максимального значення напруги при вільному падінні контейнера на мішень (випробування згідно ПБПРМ-2020) було обрано транспортно – захисний контейнер КТЗ-3,2 (рис. 1) [11]. Розрахункова схема визначення напруги уздовж грані контейнера і уздовж площини основи наведена на рисунку 2.

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.

Аналіз значень міцності досліджуваних композицій при ударному (динамічному) навантаженні показує, що необхідним рівнем динаміч-

Таблиця 2

**Питома робота руйнування та міцність при ударному (динамічному) навантаженні досліджуваних композицій на основі цементно-піщаного розчину**

Армуючий компонент	% армування	Питома робота руйнування, кДж/м <sup>3</sup> , після		Міцність композицій при ударному навантаженні, МПа, після	
		тверднення у нормальних умовах 28 діб	пропарювання при 95°C 8 годин	тверднення у нормальних умовах 28 діб	пропарювання при 95°C 8 годин
Композиції на основі цементно-піщаного розчину					
Відсутній	0	2800	2800	733,2	733,2
Скловолокно алюмоборосилікатного складу	0,5	3360	2800	803,2	733,2
	1	3920	2800	867,5	733,2
	2	4360	2800	803,2	733,2
	3	6720	3360	1135,9	803,2
	4	10640	3920	1429,3	867,5
Скловолокно лугостійкого складу	3	14000	6720	1639,5	1135,9
Скляні базальтові стрижні	1	7560	6440	1204,8	1112,0
	3	11480	7840	1484,6	1226,9
	5	22680	10640	2086,7	1429,3

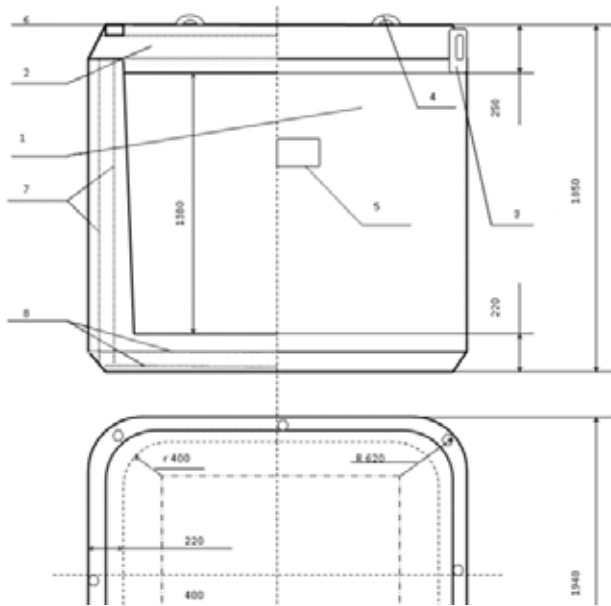


Рис. 1. Транспортно-захисний контейнер КТЗ-3,2 [11]

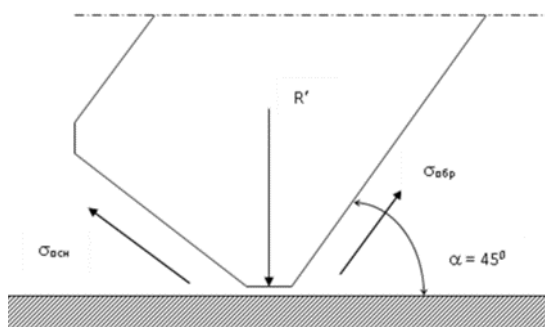


Рис. 2. Розрахункова схема визначення напруги уздовж грані контейнера і уздовж площини основи при вільному падінні на кут

ної 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).

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 металоемності 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 (ПБПРМ-2020). 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. Захоронення радіоактивних відходів. Київ: УкрНТІ, 1993. 36 с.
3. Вировий В.Н., Дорофєєв В.С., Фіц С.Б. Бетон в умовах ударної дії. Монографія. Одеса: Внешреклам-сервіс, 2004. 270 с.
4. Bentur, A., Mindess. S. Fiber Reinforced Cementitious Composites, Second Edition, Taylor and Francis Group, London and New York, 2007. 594 p.
5. Majumdar A.I., West J.M. Larner L.J. Properties of glass fibres in cement environment. J. Mater. Sci. 1977. № 5. P. 927-936.
6. Глуховський В.В., Михайлішина Н.З., Залежність міцності склоцементних композицій від гідролітичного класу склоарматури. Доповіді Перших наукових читань імені Академіка НАН України А.С. Бережного "Фізико-хімічні проблеми матеріалознавства". Харків: 2001. С. 50-51.
7. Опір матеріалів: Підручник Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Е.С. Уманський / за ред. Г.С. Писаренко. 2-ге вид., допов. і переробл. К.: Вища шк., 2004. 655 с.
8. Glukhovskiy V.V., Mikhailisina N.Z., Serbin V.P. High-strength and durable composites with non-metallic reinforcement. 9<sup>th</sup> International congress on the chemistry of cement. New Delhi, India: 1992. Vol. V. p. 475-478.
9. Glukhovskiy V.V., Biryukovich Y.L., Mikhailisina N.Z., Dashkova T.S. 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: 1997. Vol. 4. 4 pp.
10. Glukhovskiy V.V., Biryukovich Y.L. Mikhailisina N.Z., Dashkova T.S. Durability of glass fiber reinforced concrete. 13. International Baustofftagung. Weimar: 1997. P. 2-0287-2-0295.
11. Контейнер транспортно-захисний для твердих радіоактивних відходів: патент 59479 Україна: МПК7 G 21F5/005. № 2001064284; заявл. 20.06.2001; опубл. 15.09.2003, Бюл. № 9. 5 с.

### Glukhovskiy V.V., Glukhovskiy I.V. IMPACT-RESISTANT DISPERSION-REINFORCED COMPOSITES BASED ON INORGANIC BINDERS AND MINERAL FIBERS

*The article presents the results of the study of the impact strength of dispersed-reinforced composite materials based on inorganic binders and mineral fibers.*

*The state of waste storage and disposal in Ukraine, according to statistical data, remains critical, which, first of all, is due to the lack of proper infrastructure for the implementation of the specified waste management operations and the corresponding financing. Due to the low level of waste utilization, the vast majority of it continues to accumulate on the territories of enterprises.*

*In the given economic conditions of Ukraine, the widespread use of modern technologies for liquidation and disposal of highly toxic waste is unlikely. In this regard, the main way of their isolation from the biosphere is the direction of storage in systematically equipped near-surface storage facilities.*

*The development of environmentally hazardous and toxic waste management technologies involves the implementation 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.*

*Glass fibers of aluminoborosilicate composition (thickness 10...12 μm) and alkali-resistant composition (thickness 12...15 μm), as well as glass basalt rods up to 1 mm thick, were chosen as reinforcing components of impact-resistant compositions.*

*As a model for determining the stresses that arise in the structural elements of the container under shock loads, the KT3-3.2 transport-protective container for solid radioactive waste and the method of testing the container in emergency operating conditions were chosen.*

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