

УДК 69.059.25 Б 43

*І.Д. Белов, к.т.н.; М.О. Вабіщевич, к.т.н.;  
О.П. Дєдов, к.т.н.*

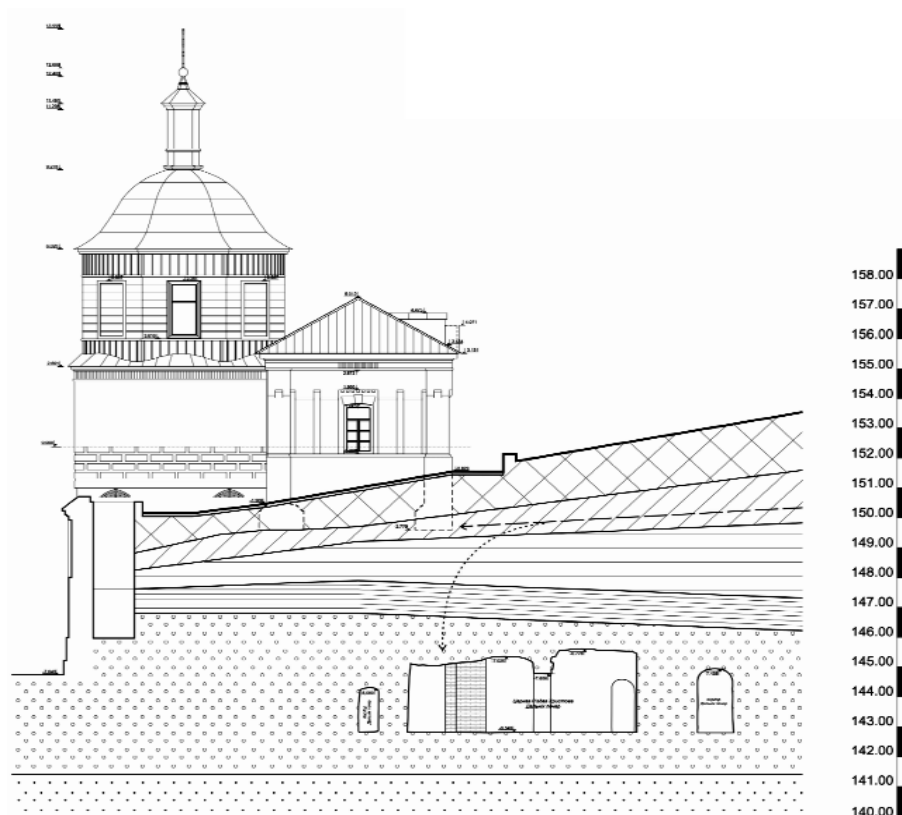
**КОМПЛЕКСНЕ РІШЕННЯ ПО  
ВІДНОВЛЕННЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ  
ПІДЗЕМНОЇ ЦЕРКВИ РІЗДВА ХРИСТОВА  
СВЯТО-УСПЕНСЬКОЇ  
КИЄВО-ПЕЧЕРСЬКОЇ ЛАВРИ**

**АНОТАЦІЯ**

На прикладі комплексного підсилення підземної Церкви Різдва Христова Свято-Успенської Києво-Печерської Лаври пропонується широке застосування композитних матеріалів в реконструкції і реставрації, що надає можливість для розвитку нового напрямку в підсиленні будівельних конструкцій та суттєвого скорочення трудомісткості, вартості і термінів виконання робіт. Наведені результати теоретичних та експериментальних вишукувань.

Ключові слова: реконструкція, реставрація, композитні матеріали, базальт, арматура, ґрунт, зусилля, переміщення, несуча здатність.

Відновлення національного фонду історичних будівель і споруд, їх довгострокове збереження є актуальною задачею і потребує використання сучасних будівельних технологій по підсиленню конструкцій з метою забезпечення їх надійної експлуатаційної здатності. На сьогоднішній день з'явилися ефективні методи з використанням нових будівельних матеріалів та технологій, які дозволяють значно збільшити міжремонтний період з мінімальним втручанням в конструкції і максимальним збереженням первісного вигляду споруди. До таких методів відносяться способи підсилення пошкоджених конструкцій в умовах експлуатації композитними матеріалами на базі базальтових і вуглецевих волокон. Ефективність використання неметалевих матеріалів для підсилення конструкцій залежить від низки факторів, таких як: вірний вибір матеріалів для конкретних умов експлуатації; вирішення задачі забезпечення їх сумісної роботи з конструкцією, що підсилюється; використання мінімально необхідної кількості матеріалу, виходячи із того, що конструкція, яка підсилюється, ще має свій ресурс несучої спроможності; разом з композитними матеріалами по необхідності використовувати традиційні матеріали: метал, цеглу, бетон, дерево. У даній статті



*Рис.1. Зовнішня ситуація над об'єктом обстеження*

описаний комплексний підхід по підсиленню національної історично-архітектурної пам'ятки Свято-Успенської Києво-Печерської Лаври – церкви Різдва Христова.

Об'єктом підсилення – є друга найдавніша церква у Дальніх печерах, що виникла між 1058 і 1062 рр. Конструктивно об'єм церкви Різдва Христова складається із арокних різнопрогонних склепінь, що обпираються на масивні ґрунтові стіни та цегляну колону. В стінах церкви виконано п'ять арокних проходів шириною 550...1380мм, висотою до 2м. Вся конструктивна частина церкви знаходиться в шарі супісків. Глибина від поверхні землі складає близько 6 м.

Ззовні над приміщеннями підземної споруди розташовані: частина будівлі корпусу № 73 на перетині осей "1хА" та схил Монастирського саду (Рис.1).

При обстеженні стану об'єкта виявлені наступні дефекти та пошкодження (Рис.2):

- глибокі тріщини в районі арочного проходу у вівтарі церкви;
- зсув в місці спряження цегляного підтримуючого стовпа із арочним склепінням;
- окремі тріщини в арочних проходах та склепіннях церкви;
- втрата загальної стійкості елементів іконостасу;



**Рис. 2.** Деформування несучих елементів Церкви Різдва Христова:

*а – втрата загальної стійкості елементами іконостасу; б, в, г – деформації зсуву перекриття*

— похилі тріщини до 2 см в вертикальних елементах (стінах) церкви.

Основними причинами деформування несучих елементів є зсувні процеси, що відбуваються в схилі над церквою, внаслідок накопичення вологи в ґрунтах оточуючого масиву за рахунок її фільтрації по схилу, що виникає в результаті атмосферних опадів та техногенних джерел живлення. Додатковими умовами для цього є: геологічна будова, деформаційна та фільтраційна неоднорідність ґрунтів, зменшення їх міцності за умов підвищення вологості, порожнини та старі виробки. Також додаткове навантаження створює частина корпусу № 73, яка знаходиться безпосередньо над церквою, про що свідчать характерні деформації цегляних стін, внаслідок нерівномірних осідань ґрунтової основи будівлі над обстежуваним об'єктом.

Зважаючи на вищезазначені фактори та неможливість прогнозування подальшої безпечної експлуатації церкви Різдва Христового в ґрунтовому масиві, технічний стан споруди був оцінений, як передаварійний (такий, що потребує термінових робіт по підсиленню).

Не дивлячись на відносно невеликий об'єм, об'єкт являється доволі складним за своєю специфічністю, яка полягає в тому що:

— це пам'ятка національного значення, яка потребує максимального збереження автентичності споруди;

— храм експлуатується в умовах вологого середовища, яке створюється ззовні внаслідок наявності поверхневої та технічної вологи;

— значне навантаження від ґрунтової поверхні, що проявляється в вигляді переміщень поверхонь, зсувів, тріщин, окремих вивалів та осідань;

— довгий термін експлуатації біля 1000 років;

— деформації проявляються не тільки в приміщеннях храму, а і в ходах, що ведуть до нього;

— характер деформацій свідчить про перенапружений стан несучих елементів підземної споруди.

Виходячи із вищевикладеного, конструкції приміщень храму та окремі ділянки території, що примикають до нього, підлягають обов'язковому підсиленню, яке повинне задовольняти такі вимоги:

— при підсиленні використати залишкові ресурси існуючих конструкцій і по можливості підвищити їх несучу здатність;

— вирішити питання про більш рівномірне розподілення навантажень шляхом введення додатко-

вих підсилюючих елементів без порушення первісного вигляду споруди;

— забезпечити довговічність експлуатації церкви після підсилення.

Після оцінювання ситуації та розрахунків запропоновано:

— на місці старої рами іконостасу встановити нову сталеву жорстку раму, яка зможе сприйняти навантаження та передати його на основу через мікропальові фундаменти;

— окремі вертикальні елементи укріпити шляхом взяття їх в обійму з вуглецевого волокна;

— склепіння храму та частково ходи, які прилягають до нього, підсилити за допомогою каркасів із базальтової та вуглецевої арматури;

— провести попередні теоретичні дослідження моделі фрагменту склепіння та експериментальні дослідження несучої здатності аналогічної натурної моделі без підсилення та з підсиленням об'ємним каркасом з базальтової арматури;

— виконати благоустрій території над об'єктом з організацією відведення атмосферних і ґрунтових вод та проведенням заходів по зменшенню тиску на підземну споруду від розташованої зверху будівлі.

#### **Основні характеристики неметалевих матеріалів для підсилення окремих конструктивних елементів об'єкта**

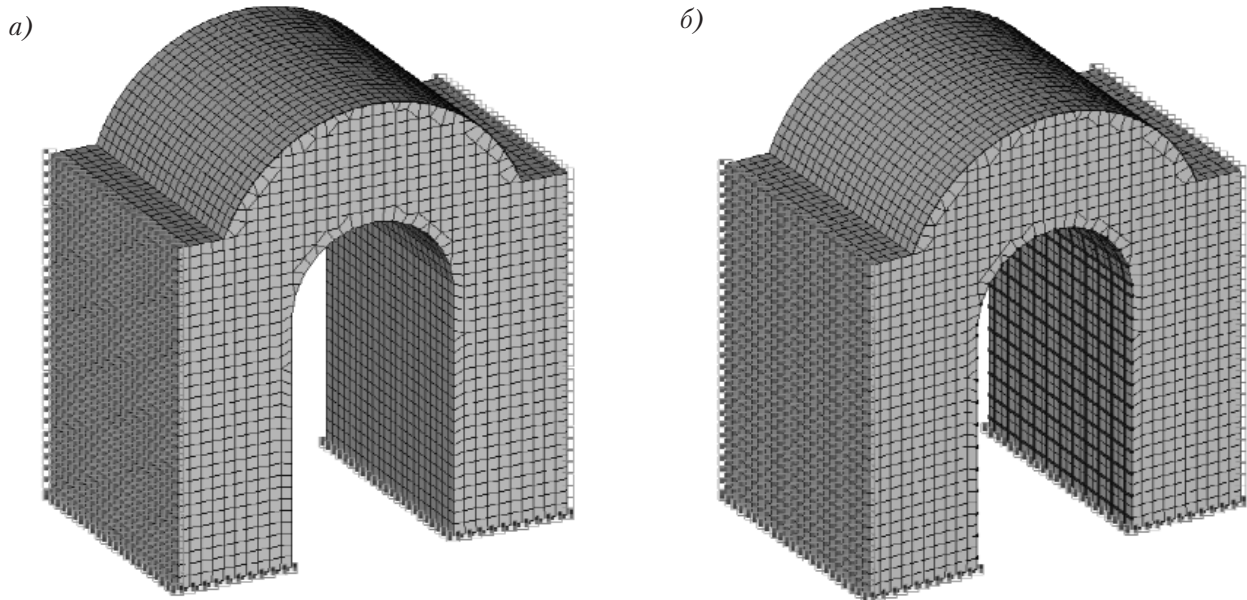
— Вуглецева арматура Sika Carbodur BC — стержні  $\varnothing$  6-12 мм із вуглецевих волокон просочених термопластичним зв'язуючим; модуль пружності вздовж волокон — 148000 МПа; міцність на розтяг — 3100 МПа; деформація при розтягу > 1,7 %.

— вуглецеве полотно: щільність — 1,76 г/м<sup>3</sup>; вага — 230 г/м<sup>2</sup>; товщина — 0,131 мм; міцність на розтяг — 4300 МПа; модуль пружності — 238000 Мпа; деформація при розтягу — 1,8 %;

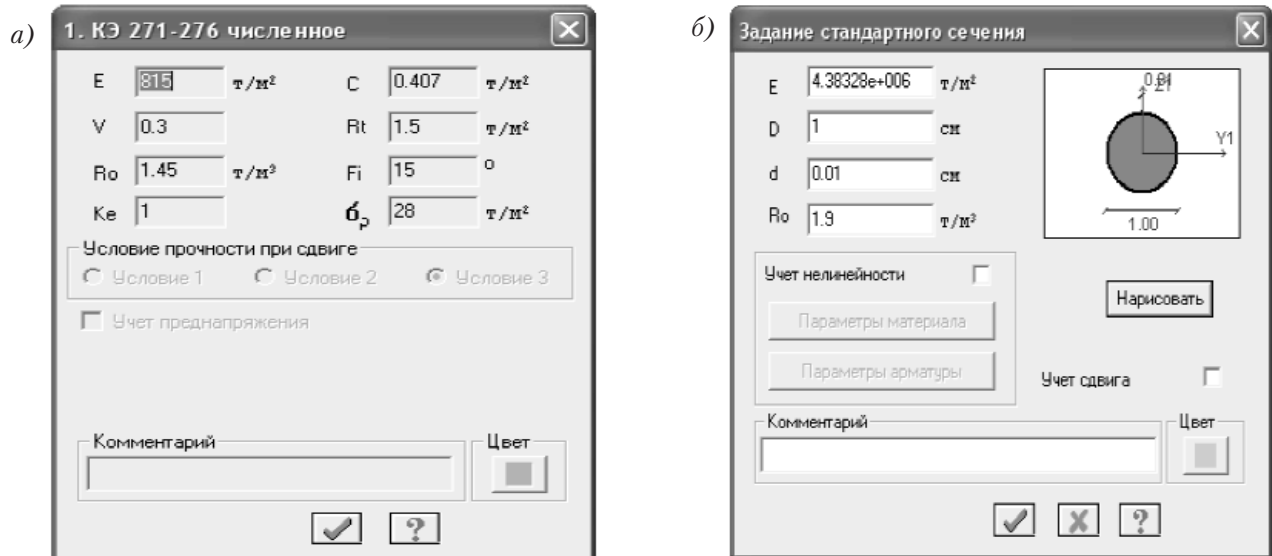
— базальтова арматура — стержні  $\varnothing$  8-10 мм. із базальтових волокон зв'язаних полімером; міцність 700-1300 МПа; модуль пружності 60000 МПа; відносне подовження — 2,2 %.(1).

#### **Оцінка можливості використання неметалевої арматури для підсилення ґрунтової конструкції на математичній моделі**

Для впевненості в надійності композиції "базальтова арматура — зв'язуючий матеріал — ґрунт" та визначення можливості ефективного включення неметалевої арматури в роботу конструкції проведені



**Рис. 3.** Скінченно-елементні моделі підземного ходу  
а) без армування; б) з армуванням з внутрішнього боку



**Рис. 4.** Фізико-механічні параметри матеріалів:  
а) ґрунтовий масив; б) базальтова арматура

дослідження розрахункової моделі печерного ходу з натуральними геометричними розмірами. Статичний розрахунок виконаний в програмному комплексі "Ліра" для двох скінченно-елементних моделей: при наявності та відсутності внутрішнього шару армування (Рис. 3). Апроксимація ґрунтового масиву виконана з використанням просторових 8-вузлових скінченних елементів типу №276 з фізико-механічними параметрами наведеними на рис. 4,а). Арматурні стрижні апроксимовані стрижневими скінченними елементами, фізико-механічні та геометричні характеристики яких наведені на Рис.4,б).

Граничні кінематичні умови (закріплення) прийняті у відповідності до параметрів моделі, що

випробовувалася так: бічні грані закріплені від горизонтальних переміщень по осі "X"; опорні торці – жорстко защемлені.

Навантаження, що діють на ґрунтове склепіння:

- постійні – від власної ваги ґрунтового масиву та елементів підсилення;
- тимчасові – рівнорозподілені по площі від навантажувальних пристроїв.

### Результати розрахунків

Аналіз напружено-деформованого стану скінченно елементних моделей виконаний шляхом порівняння головних напружень та переміщень двох

типів моделей. Значення головних напружень та переміщень по трьох осях координат наведені в таблиці 1.

Аналіз отриманих результатів вказує на те, що при включенні в роботу конструкції шару армування максимальні значення нормальних напружень вздовж осей X та Z практично ідентичні, однак розподілення напружень істотно відрізняється. Так в ґрунтовому масиві без армування максимальні напруження виникають в опорних зонах стінок склепіння, а при наявності армувального шару — біля аркової частини.

Слід відмітити, що на відміну від напружень по осях X та Z, значення напружень вздовж осі Y відрізняються і якісно (за характером розповсюдження по тілу об'єкта), і кількісно — зусилля стиску при армуванні зростають, а розтягу — відповідно зменшуються у порівнянні з моделлю без армування.

Окремо звернемо увагу на зміну величин переміщень по осі Z. Максимальні значення вказаного параметра при наявності підсилення менші майже втричі, у порівнянні з вихідною моделлю. Крім того істотно відрізняються і форми деформацій (Див. рис. 5).

#### Експериментальні дослідження

Для підтвердження теоретичних досліджень виготовлений експериментальний зразок з подібного натурним умовам ґрунту із габаритними розмірами "2500 (висота) x 1700 (ширина) x 1000 (глибина), в якому був виконаний арковий прохід розміром 2000x700x1000мм у відповідності до реальних умов печерного комплексу. Метою експериментальних досліджень дослідного зразка в лабораторних умовах було визначення реального впливу підсилюючого неметалевого армування на

несучу здатність моделі і розподіл зусиль в дослідній конструкції.

Випробування виконувалось у два етапи — перший полягав у створенні напружено-деформованого стану моделі, який максимально відображав стан ґрунтового масиву в природних умовах, другий у визначенні максимального значення несучої здатності зразка в цих умовах. Експериментальні навантаження розраховувались на основі фактичних навантажень на об'єкт.

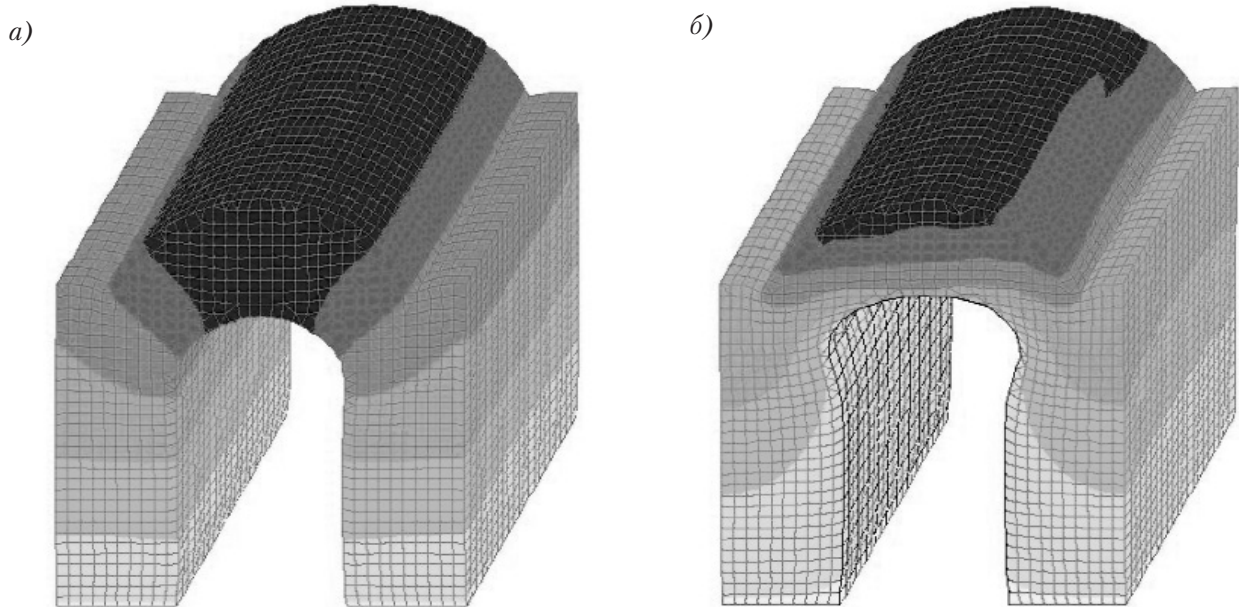
За критерії оцінки стану натурної моделі були прийняті величини деформацій, зафіксовані в реальному ґрунтовому масиві при обстеженні та характерний вигляд деформованих діляниць.

На другому етапі передбачалось підсилення під навантаженням деформованого дослідного зразка шляхом включення в роботу просторового каркасу з базальтової арматури та подальше випробування. Каркас з базальтової арматури діаметром 8мм являв пласку гнучку горизонтальну сітку з чарункою 120x120мм, яка вставлялась у попередньо зроблені пази глибиною 20мм, шириною 10мм з аналогічною чарункою і закріплювалась до базальтових анкерів довжиною 150мм, встановлених на спеціальній суміші виробництва "Фішер" для ґрунту. Після влаштування каркасу пази заповнювались сумішшю СМ85. Таким чином створювався об'ємний каркас з частковим включенням в роботу шару ґрунту товщиною 120-150мм (3).

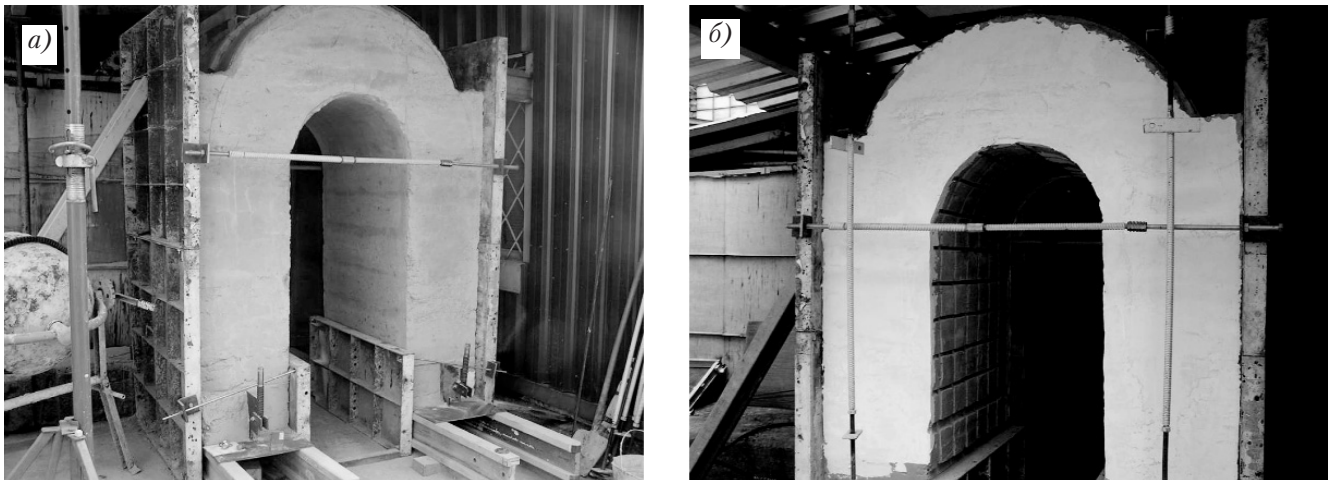
Даний підхід дозволив змодельовати: 1) існуючий стан перевантажених реальних конструкцій (перший етап випробування); 2) можливість підсилення конструкцій під навантаженням; 3) оцінити вплив просторового арматурного каркасу на загальну несучу спроможність дослідного зразка (другий етап випробування).

Таблиця 1. Порівняння результатів

Параметри	Модель без армування				Модель з армуванням			
	Нав-ня №1*		Нав-ня №2**		Нав-ня №1 *		Нав-ня №2**	
	Позитив	Негатив	Позитив	Негатив	Позитив	Негатив	Позитив	Негатив
$N1, \text{т/м}^2$	16	-14.8	28.3	-24.1	15	-13.9	24.5	-23.1
$N2, \text{т/м}^2$	14.6	-20.7	25.5	-33.8	9.71	-25.5	16.1	-42
$N3, \text{т/м}^2$		-89.3		-136		-82.8		-136
$\Delta x, \text{мм}$	7.11	-7.35	12.1	-12	9.1	-9.42	15	-15.5
$\Delta y, \text{мм}$	12.3	-12.3	20.4	-20.1	7.03	-5.66	11.7	-9.43
$\Delta z, \text{мм}$		-20.4		-37.5		-8.6		-16.5



**Рис. 5.** *Форми деформації ґрунтових моделей:  
а) без армування; б) з урахуванням армування*



**Рис. 6.** *Загальний вигляд моделі після виготовлення (а), влаштування пазів для арматурного каркасу (б)  
(за допомогою опалубочних щитів змодельовані заземлення опорних частин та закріплення від переміщень по вісі Х)*

На першому етапі випробувань поява першої тріщини розкриттям 0,05-0,1 мм зафіксована при навантаженні 6400 кг (Рис.7). При рівні навантаження 9000 кг, що складає 140 % від початку тріщиноутворення був зафіксований критичний стан конструкції та небезпека руйнування моделі. Експеримент був зупинений для підсилення конструкції, при цьому, максимальне переміщення в центрі склепіння склало 15,11 мм, розкриття тріщин – до 3 мм.

Після підсилення під навантаженням 70% від максимальної несучої здатності дослідного зразка, всі тріщини були ін'єктовані і процес навантаження продовжився.

На другому етапі перша тріщина розкриттям 0,05 мм зафіксована на рівні навантаження 11500 кг

(Рис. 8), що складає 179 % в порівнянні з першим випробуванням.

Щоб не руйнувати дослідний зразок та для подальшого його використання, випробування були зупинені при навантаженні 15000 кг, при якому розкриття тріщин склало 0,1-0,3 мм, а відношення по навантаженню до аналогічного стану зразка без армування склало 208 %.

Таким чином, підсилення дало значне підвищення несучої здатності моделі, що в першу чергу пов'язано зі встановленням анкерних базальтових стрижнів, в результаті чого, був створений об'ємний арматурний каркас, який одночасно включив в сумісну роботу ґрунтовий масив товщиною 120-150 мм.



*Рис. 7. Характер деформації отриманий під час першого етапу випробувань*



*Рис. 8. Характер деформацій отриманий під час другого етапу випробувань*

Слід відмітити, що питання безпечної та довготривалої експлуатації між ремонтами підсилюваних будівель і споруд є актуальним. Аналіз вітчизняного (2) та закордонного досвідів вказує на доцільність та економічну ефективність використання композитних матеріалів при підсиленні будівель і споруд за такими показниками:

- вуглецева та базальтова арматури, вуглецеве полотно являються корозійно стійкими матеріалами, які не піддаються корозії впродовж довгого часу, не менш як 80 років;

- неметалеві матеріали мають достатні механічні показники для використання в якості підсилюючих елементів;

- неметалева арматура має пружні якості і при згинанні приймає форму поверхні підсилення. Якщо поверхня має криволінійну форму, виникає ефект попереднього напруження, що дає можливість більш ефективного включення арматури в роботу конструкції на етапі її підсилення;

- композитні матеріали також зручні для використання у випадках коли необхідно зберегти зовнішній вигляд конструкцій, що підсилюються (пам'ятки історії і архітектури);

- використання композитних матеріалів — це ефективний напрямок в реконструкції (реставрації) пам'яток історії та архітектури, який забезпечує суттєве скорочення трудомісткості, вартості, термінів виконання робіт зі значним збільшенням проміжків часу між ремонтами.

**Висновки:** в результаті випробувань встановле-

но, що використання базальтової арматури в якості елемента підсилення є ефективним і дозволяє не тільки відновлювати несучу здатність пошкоджених конструкцій, а також надає можливість значно підвищити їх експлуатаційні якості.

Підтверджені результати чисельних досліджень деформовано — напруженого стану при співставленні їх з результатами експериментів (Рис. 5-7).

Що стосується самого об'єкту підсилення, то:

- заходи по укріпленню Церкви Різдва Христова розподілились на внутрішні та зовнішні:

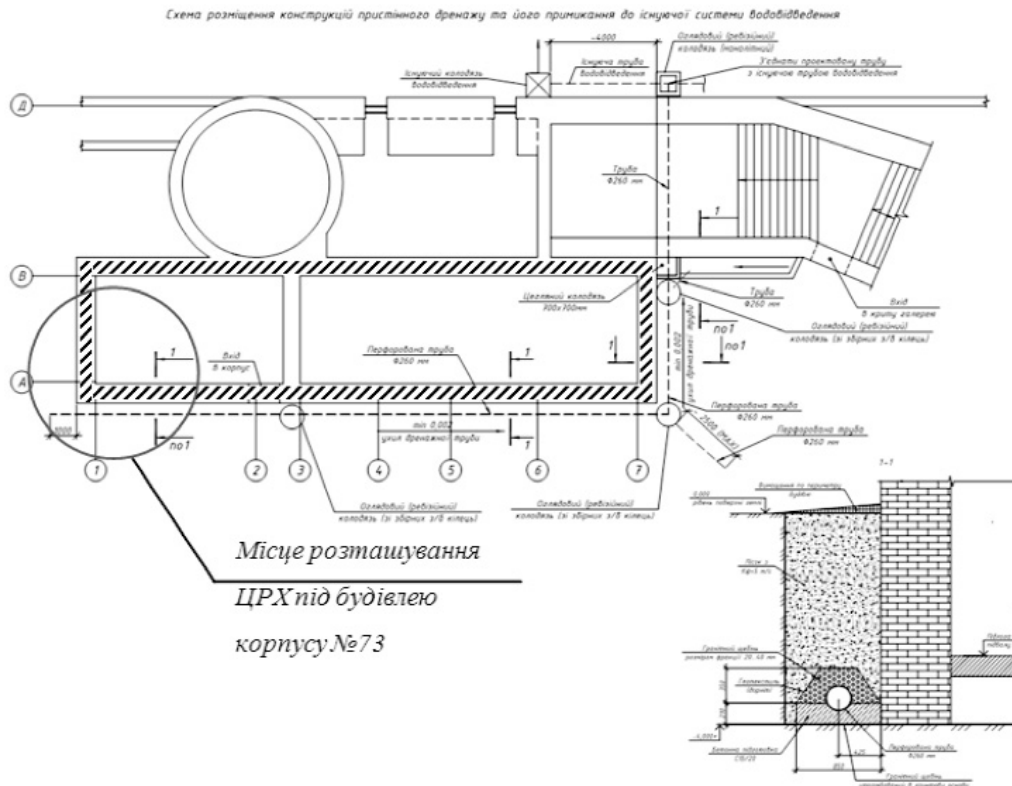
- **зовнішні** — благоустрій території, водовідведення поверхневої води, влаштування дренажної системи, яка перехоплює ґрунтові води і відводить їх з території об'єкта;

- підсилення корпусу № 73 зі створенням жорсткого просторового блоку з мінімальними осіданнями над Церквою Різдва Христова;

- **внутрішні** заходи складаються з комплексу різних укріплень окремих конструктивних елементів в залежності від доцільності та ефективності в кожному конкретному місці, де основним визначальним фактором є рівень надійного включення в сумісну роботу елементів підсилення з конструкцією що підсилюється.

### Результати

- На підставі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень розроблена і реалізована проектна документація шляхом виконання будівельних робіт на всій території обстежуваного



**Рис. 9.** Благоустрій та підсилення над церквою Різдва Христова:  
 – влаштування внутрішнього двоповерхового сталевого каркасу жорстко пов'язаного з поздовжніми та поперечними несучими стінами;  
 – водовідвід від ЦРХ та корпусу шляхом влаштування дренажів на глибині 4-5 м та 1,5-2 м.

комплексу включаючи, як саму церкву Різдва Христова в підземному просторі, так і зовнішні будівлі і споруди.

– Отриманий практичний досвід використання неметалевих матеріалів при підсиленні конструктивних елементів під навантаженням з одночасним забезпеченням їх сумісної роботи

#### ЛІТЕРАТУРА

1. *Технічні умови. Арматура неметалева композитна базальтова періодичного профілю: ТУ У В.2.7-25.2-34323267-001:2009* – [Чинні від 26-10-2009]. Мінрегіонбуд України 2009. (Технічні умови).

2. *Таран В.В. Особенности применения композитной арматуры при возведении строительных конструкций зданий и сооружений.* / В.В.Таран, А.В. Янков// *Вестник ДНАБА №6. 2013.*

3. *James A. Mason and Donald A. Bruce. Lizzi?s Structural Sistem Retrofit with Reticulated Internal Reinforcement Method*

#### АННОТАЦІЯ

На прикладі комплексного посилення підземної Церкви Різдва Христова Києво-Печерської Лав-

ри предлагается широкое использование композитных материалов в реконструкции и реставрации, что даёт возможность развития новых направлений в усилении строительных конструкций, обеспечивающие существенное сокращение трудоемкости, стоимости и сроков выполнения работ. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: реконструкция, реставрация, композитные материалы, базальт, арматура, грунт, усиления, перемещения, несущая способность.

#### ANNOTATION

On the example of the complex strengthening of underground Church of Christmas Christly Kiev-Pecherskaya Lavra the wide use of composite materials is offered in a reconstruction and restoration, that can develop new directions in strengthening of build constructions, providing substantial reduction of labour intensiveness, cost and terms of implementation of works. The information of theoretical and experimental researches are resulted.

Keywords: reconstruction, restoration, composite materials, basalt, rebar, soil, stress, displacement, carrying capacity.