

УДК 539.3:69.002.5

DOI: 10.15587/2312-8372.2019.182732

**ЧИСЕЛЬНО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ
ПЕЧЕРНОГО ХОДУ**

Бєлов І. Д., Вабищевич М. О., Дєдов О. П.

**ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ
ПЕЩЕРНОГО ХОДА**

Белов И. Д., Вабищевич М. О., Дедов О. П.

**NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE CAVE
PASSAGE MODEL**

Belov I., Vabischevich M., Dedov O.

Об'єктом досліджень є ґрунтова модель ділянки печери, що апроксимує частину підземної споруди Києво-Печерської лаври (Київ, Україна). Тривала експлуатація підземних історичних споруд в стиснених умовах при 100 % вологості та під дією агресивних впливів внутрішніх і зовнішніх чинників призводить до вичерпання їх конструктивної надійності. При реставрації історичних об'єктів є доцільним об'єднання залишкових ресурсів разом з локальними конструктивними підкріпленнями. Завдяки цій концепції відновлюється первісний стан, і конструкції можуть ще довгий час виконувати свої функції в умовах існуючого середовища. Такі підсилення створюють міцні і жорсткі осередки, які об'єднують об'єкт в єдине ціле.

Означений підхід був апробований шляхом натурного випробування моделі фрагменту підземного ходу Дальніх печер, виконаної із супіску в натуральну величину. Дослідження проводилися на базі Випробувального центру будівельних конструкцій Київського національного університету будівництва і архітектури в період з 2012 по 2019 рр. Розроблена методика підсилення ґрунтового масиву внутрішнім базальтовим армуванням – плоскими каркасами – була використана під час реставрації окремих ділянок підземних споруд Києво-Печерської лаври. Водночас з натурними випробуваннями виконувалися і чисельні дослідження відповідної математичної моделі. Чисельно-експериментальний підхід до аналізу напружено-деформованого стану (НДС) моделі підземної споруди дає змогу коректно визначити розрахункові параметри, які дозволять максимально наближено апроксимувати реальну підземну споруду.

Для збільшення ефективності використання базальтового армування досліджено спосіб введення окремих стрижнів в пошкоджений шар ґрунту, який перебуває під навантаженням. Такий спосіб підсилення запропоновано використати під час реставрації Варязьких печер Києво-Печерської лаври, які

отримали численні пошкодження у вигляді вертикальних та похилих тріщин стелі і стін з вивалами ґрунту.

Ключові слова: реставрація історичних об'єктів, базальтова арматура, ґрунтова модель ділянки печери, фізична нелінійність, скінченно-елементна модель.

Объектом исследований является ґрунтовая модель участка пещеры, аппроксимирующая часть подземного сооружения Киево-Печерской лавры (Киев, Украина). Длительная эксплуатация подземных исторических сооружений в стесненных условиях при 100 % влажности и под действием агрессивных воздействий внутренних и внешних факторов приводит к исчерпанию их конструктивной надежности. При реставрации исторических объектов является целесообразным объединение остаточных ресурсов вместе с локальными конструктивными подкреплениями. Благодаря этой концепции восстанавливается первоначальное состояние, и конструкции могут еще долгое время выполнять свои функции в условиях существующей среды. Такие усиления создают прочные и жесткие ячейки, которые объединяют объект в единое целое.

Указанный подход был апробирован путем натурного испытания модели фрагмента подземного хода Дальних пещер, выполненной из супеси в натуральную величину. Исследования проводились на базе Испытательного центра строительных конструкций Киевского национального университета строительства и архитектуры в период с 2012 по 2019 гг. Разработанная методика усиления ґрунтового массива внутренним базальтовым армированием – плоскими каркасами – была использована при реставрации отдельных участков подземных сооружений Киево-Печерской лавры. В то же время с натурными испытаниями выполнялись и численные исследования соответствующей математической модели. Численно-экспериментальный подход к анализу напряженно-деформированного состояния (НДС) модели подземного сооружения позволяет корректно определить расчетные параметры, которые позволят максимально приближенно аппроксимировать реальное подземное сооружение.

Для увеличения эффективности использования базальтового армирования исследовано способ введения отдельных стержней в поврежденный слой ґрунта, который находится под нагрузкой. Такой способ усиления предложено использовать при реставрации Варяжских пещер Киево-Печерской лавры, которые получили многочисленные повреждения в виде вертикальных и наклонных трещин потолка и стен с вивалами почвы.

Ключевые слова: реставрация исторических объектов, базальтовая арматура, ґрунтовая модель участка пещеры, физическая нелінійність, конечно-элементная модель.

1. Вступ

Підземний простір, де існують історичні споруди Києво-Печерської лаври (Ближні, Дальні та Варязькі печери) постійно піддається активним впливам оточуючого середовища. Нейтралізація впливів складає значні труднощі

внаслідок стиснених умов експлуатації і необхідності виконання відновлювальних робіт під постійно діючим навантаженням.

Варязькі печери є частиною Дальніх печер Лаври (Київ, Україна). Печерні ходи викопані в шарі коричнево-сірого і буро-жовтого Полтавського пісковика. Потужність шару пісковика коливається від 2–3 до 6–8 м. Полтавський піщаник перекриває піски Харківської свити, що представлені в районі печер зеленувато-сірими глауконітовими дрібнозернистими пісками, частково суглинками і супісками. Потужність шару пісків коливається від 1–2 до 5–8 м.

Сучасний стан Варязьких печер можна назвати критичним. У зв'язку зі 100 % вологістю повітря і відсутністю елементарного догляду у підземеллях за останні роки відбулося більше десяти великих і дрібних обвалів ділянок стін і зводів печер [1, 2]. Основна маса їх відбувається внаслідок прогресуючої деструкції матеріалів [3, 4].

Подібна ситуація спостерігалася і на окремих ділянках Ближніх і Дальніх печер. Однак завдяки регулярному проведенню поточних ремонтів і локальним підсиленням аварійні пошкодження були локалізовані. Окремі ділянки Дальніх печер: церква Різдва Христова і вихідний коридор з печер були підсилені за допомогою армування внутрішньої поверхні ґрунтових склепінь сітками із базальтової арматури [5, 6]. На базі Київського національного університету будівництва і архітектури (КНУБА) для підтвердження ефективності та з метою вивчення особливості роботи вказаного способу підсилення були проведені чисельно-експериментальні дослідження [7] ґрунтової моделі фрагменту печерного ходу, побудованої в масштабі 1:1. Слід зазначити, що питання використання неметалевих стрижнів для армування бетонних виробів неодноразово підіймалися в публікаціях вітчизняних авторів [8, 9].

Результати випробувань та нелінійного розрахунку скінчено-елементної моделі конструкції підтвердили ефективність застосування сіток із базальтових арматурних стрижнів в якості елементів підсилення ґрунтового склепіння.

Однак, враховуючи суттєву геометричну неоднорідність Варязьких печер, велику трудомісткість відновлення в складних і небезпечних умовах, а також вимогу до збереження автентичності об'єкту, використання арматурних сіток стає неможливим. Тому актуальним є дослідження розглянутої в статті модифікованої методики підсилення базальтовою арматурою шляхом заміни сіток на окремі стрижні, що анкеряться в ґрунтовий масив на клейовій суміші. В літературі зустрічаються подібні способи підсилення тільки для надземних, зокрема кам'яних конструкцій [10].

Таким чином, *об'єктом дослідження* є ґрунтова модель ділянки печери, що апроксимує частину підземної споруди Києво-Печерської лаври (Київ, Україна). *А метою роботи* є визначення поведінки ґрунтової моделі фрагменту печерного ходу з дефектами типу тріщин, підсиленої окремими базальтовими арматурними стрижнями, під дією статичного навантаження.

2. Методика проведення досліджень

Експериментальні дослідження проводилися на дослідному зразку, який сім років перебував на відкритому повітрі під впливом оточуючого середовища, що спричинило суттєві пошкодження (рис. 1):

- розвиток кореневої системи внаслідок проростання рослин на арочному склепінні;
- глибоку перфорацію ґрунту комахами з усіх боків моделі;
- розмивання ґрунту атмосферними опадами.

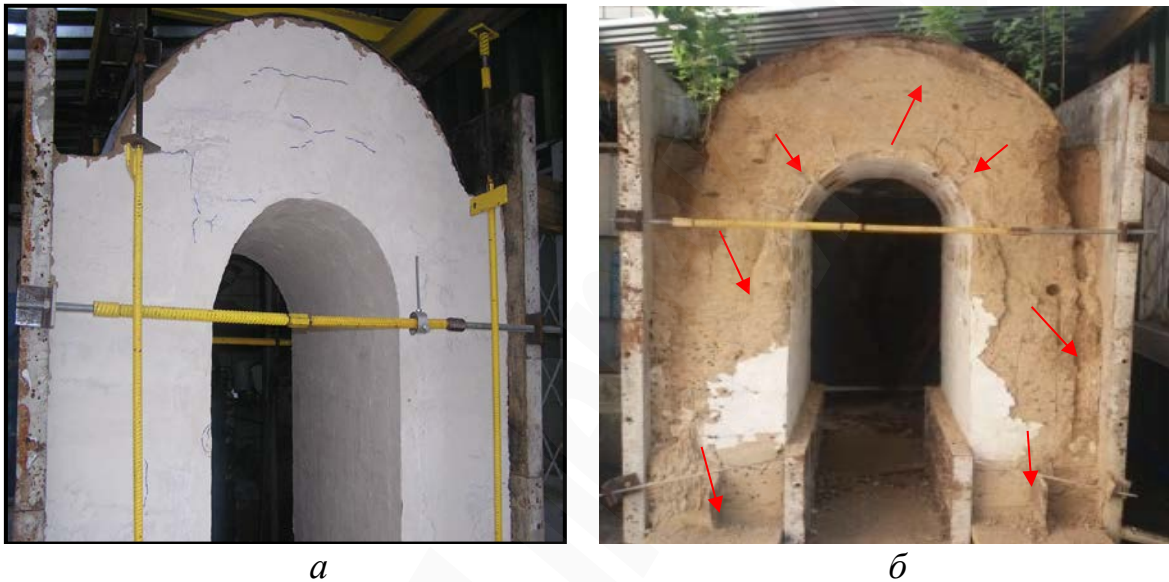


Рис. 1. Ґрунтова модель фрагменту печерного ходу:
а – 2012 рік; *б* – 2019 рік

Стан зразка був оцінений, як не придатний до нормальної експлуатації, що має стійку тенденцію до аварійного, за рахунок:

- втрат біля 30 % перерізу;
- руйнування арочної частини коренями дерев;
- наскрізними дрібними масовими пошкодженнями основи діаметром 4–5 мм.

Випробування проводилось у два етапи – перший полягав у визначенні залишкової несучої здатності моделі після семирічного перебування на відкритому повітрі. Навантаження зразка відбувалося до моменту вигину із площини оголеного вертикального стрижня решітки арматурного каркасу на 1/10 від величини відстані між точками розкріплення (рис. 2).

При досягненні величини граничного вигину стрижня (1.2 см) процес навантаження зразка призупинявся і ґрунтовий масив, що перебував в напруженому стані, підсилювався додатковими, не зв'язаними з арматурним каркасом, окремими похилими базальтовими стрижнями. Стрижні діаметром 10 мм і довжиною 300 мм встановлювались по середині внутрішньої частини моделі двома рядами з кроком 240x120 мм. Для виключення із роботи попередньо встановленого каркасу, вертикальні стрижні сітки були розрізані.



Рис. 2. Граничний вигин стрижня (1.2 см)

Після виконання підсилення процес навантаження було продовжено. За умову зупинки експерименту було визначено два критерії: або появу ознак руйнування моделі, або досягнення навантаженням величин, максимально допустимих для силового обладнання стенду.

Одночасно з натурними випробуваннями було виконане чисельне дослідження модифікованої у відповідності до заданої схеми скінчено елементної моделі експериментального зразка. Статичний аналіз конструкції виконаний у фізично нелінійній постановці з використанням обчислювального комплексу «Лира САПР», що базується на використанні методу скінчених елементів.

Апроксимація ґрунтового масиву виконана з використанням просторових 8-вузлових скінчених елементів типу № 276. Арматурні стрижні апроксимовані стрижневими скінченими елементами. Граничні кінематичні умови (закріплення) прийняті у відповідності до параметрів моделі, що випробовувалася: бічні грані закріплені від горизонтальних переміщень по осі «Х»; опорні торці – жорстко защемлені.

3. Результати дослідження та обговорення

В ході натурних випробувань першого етапу експерименту спостерігались поява та розкриття нових волосяних тріщин в основному масиві ґрунту, а також поступовий вигин із площини крайніх стрижнів арматурної сітки, які не були розкріплені ґрунтом. При досягненні величини граничного вигину стрижня 1.2 см процес навантаження зразка був призупинений. Зафіксоване значення сумарного вертикального навантаження склало 11.8 тс або 3.5 тс/м^2 .

На другому етапі, після введення в ґрунтовий масив додаткових базальтових стрижнів підсилення, випробування було продовжено поступовим завантаженням моделі до величини 17.5 тс (5.6 тс/м^2). Подальше зростання навантаження призвело до пошкодження силового обладнання стенду. При цьому нових деформацій і пошкоджень на поверхні ґрунтового масиву не зафіксовано.

Результати чисельного аналізу математичної моделі зразка (табл. 1) за критерієм вертикальних переміщень (вздовж осі Z) також підтвердили підвищену жорсткість армованої моделі.

Таблиця 1

Екстремальні переміщення вузлів скінченноелементної моделі (СЕМ)

Параметри	Модель без армування		Модель з армуванням	
	Додатні	Від'ємні	Додатні	Від'ємні
Δx , мм	7.11	-7.35	9.1	-9.42
Δy , мм	12.3	-12.3	7.03	-5.66
Δz , мм	-	-99.5	-	-30.1

Максимальні значення переміщень вузлів скінченноелементної моделі (СЕМ) при наявності підсилення менші майже втричі, у порівнянні з вихідною моделлю. Крім того істотно відрізняються і форми деформацій (рис. 3).

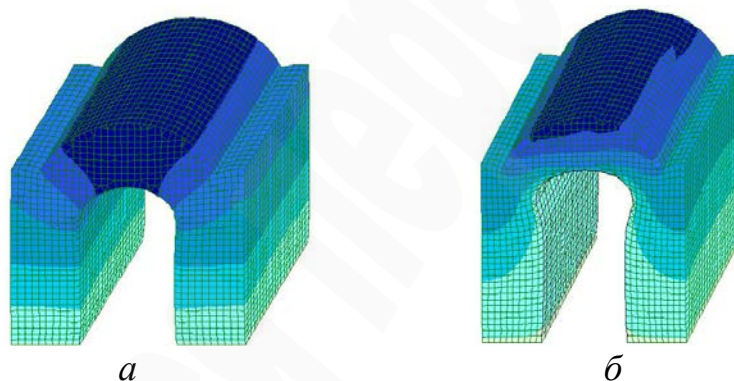


Рис. 3. Форми деформацій скінченноелементної моделі (СЕМ):
a – без армування; *б* – з урахуванням армування

4. Висновки

В ході натурних випробувань ґрунтової моделі ділянки печери, що апроксимує частину підземної споруди Києво-Печерської лаври, вперше визначено особливості роботи двох варіантів підсилення базальтовою арматурою: сітками та окремими похилими стрижнями.

Результати натурних та чисельних досліджень підтвердили ефективність застосування окремих базальтових стрижнів, що анкеряться в ґрунтовий масив на клейових сумішах, в якості елементів підсилення підземних споруд типу штучних печер. Отримані дані можуть бути цікавими для організацій та фахівців, що спеціалізуються на реставрації та підсиленні пам'яток архітектури.

Література

1. Kolpakova, V. M. (2012). Doslidzhennia pecherykh kompleksiv Kyievo-Pecherskoi Lavry. *Lavrskyi almanakh: Kyievo-Pecherska Lavra v konteksti Ukrainskoi istorii ta kultury*, 27 (10), 376.

2. Cherevko, I. (2017). Doslidzhennia vplyvu hidroheolohichnykh umov na stan zberezhennia pidzemnykh kompleksiv na prykladi Blyzhnykh pecher Kyievo-Pecherskoi Lavry. *Osoblyvosti monitoryngu pamiatok arkhitektury*, 72–85.

3. Romanchenko, O. D. (2018). Problemni pytannia zberezhennia Variazkykh pecher. *Problemy zberezhennia ta vykorystannia istorychnykh pidzemnykh kompleksiv i umovakh nehatyvnykh tekhnohennykh vplyviv*. Natsionalnyi zapovidnyk «Chernihiv Starodavnii», 73–83.

4. Starostenko, V. I., Antoniuk, A. E., Demchishin, M. G. et. al. (2011). Problemy sokhraneniia arkhitekturnogo naslediia istoricheskogo centra Kieva v usloviiakh vozrastaiushego ekologo-tekhnologicheskogo riska. *Geofizicheskii zhurnal*, 33 (6), 3–11.

5. DSTU B V.2.7.-312:2016. *Armatura nemetaleva kompozytna bazaltova periodychnoho profilu*. Available at: http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page.html?id_doc=65007

6. TU U V.2.7-25.2-34323267-001:2009. *Armatura nemetaleva kompozytna bazaltova periodychnoho profilu*. Available at: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=26947

7. Bielov, I. D., Vabishchevych, M. O., Diedov, O. P. (2015). Kompleksne rishennia po vidnovlenni tekhnichnogo stanu pidzemnoi tserkvy Rizdva Khrystova Sviato-Uspenskoï Kyievo-Pecherskoi Lavry. *Novi tekhnolohii v budivnytstvi*, 29, 10–29.

8. Klimov, Yu. A., Vitkovskiy, Yu. A., Soldatchenko, O. S. (2011). Vykorystannia nemetalevoi kompozytnoi armatury dlia armuvannia betonnykh konstruksii. *Budivelni materialy, vyroby ta sanitarna tekhnika*, 42, 13–17.

9. Mason, J. A., Bruce, D. A. (2001). Lizzi's Structural System Retrofit with Reticulated Internal Reinforcement Method. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1772 (1), 107–114. doi: <http://doi.org/10.3141/1772-12>

10. Di Ruocco, G. (2016). Basalt fibers: the green material of the XXI-century, for a sustainable restoration of historical buildings. *VITRUVIO – International Journal of Architectural Technology and Sustainability*, 1 (2), 25–39. doi: <http://doi.org/10.4995/vitruvio-ijats.2016.6984>

The object of research is the soil model of the cave site, which approximates part of the underground structure of the Kyiv Pechersk Lavra (Kyiv, Ukraine). Long-term operation of underground historical buildings in cramped conditions at 100 % humidity and under the influence of aggressive influences of internal and external factors leads to the exhaustion of their structural reliability. When restoring historical objects, it is advisable to combine the residual resources together with local structural reinforcements. Thanks to this concept, the original state is restored, and the structures can still perform their functions for a long time in the existing environment. Such amplifications create strong and rigid cells that combine the object into a single whole.

This approach was tested by full-scale testing of a model of a fragment of the underground passage of the Far Caves, made of sandy loam in full size. The studies were carried out on the basis of the Test Center for Building Structures of the Kyiv

National University of Construction and Architecture from 2012 to 2019. A technique for strengthening the soil mass with internal basalt reinforcement – flat frames – was developed. It was used in the restoration of certain sections of the underground structures of the Kyiv Pechersk Lavra. At the same time, numerous studies of the corresponding mathematical model were carried out with full-scale tests. A numerical-experimental approach to the analysis of the stress-strain state (SSS) of an underground structure model allows one to correctly determine the design parameters that will allow as close as possible to approximate a real underground structure.

To increase the efficiency of using basalt reinforcement, the method of introducing individual rods into the damaged soil layer, which is under load, is investigated. Thus, it is proposed to use the reinforcements during the restoration of Variazhski caves of the Kyiv Pechersk Lavra, which received numerous damages in the form of vertical and inclined cracks in the ceiling and walls with soil outcrops.

Keywords: *restoration of historical objects, basalt reinforcement, soil model of a cave site, physical non-linearity, finite element model.*