

ДЕЯКІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ АРХІТЕКТУРНОЇ СПАДЩИНИ УКРАЇНИ

Важке сьогоднішня Україна пов'язане з воєнними діями на її території. Це призводить до загибелі людей, їх поранень, великої матеріальної шкоди, значних руйнувань, інших збитків. Не виключенням є й культурна спадщина нашої держави, зокрема відповідні архітектурні об'єкти. Тому їхнє збереження та подальше відновлення після настання миру становить актуальну проблему.

В окресленому аспекті особливо важливе своєчасне накопичення різноманітної інформації, необхідної для успішного виконання вказаних завдань. Відомо, що архітектура являє собою основу нерухомої культурної спадщини, містить окремі будівлі, споруди, їхні комплекси, а також території, що донесли до теперішнього часу певну історично-мистецьку цінність, зберегли свою автентичність. У наведених умовах ключову роль відіграє охорона архітектурних пам'яток, як цілісна система правових, організаційних, матеріально-технічних, містобудівних, фінансових та інших заходів, спрямованих на виявлення, дослідження, реставрацію, ремонт тощо зазначеної спадщини.

Для вирішення перерахованих питань потрібно мати всебічні ґрунтовні відомості про кожен такий об'єкт. До складу його облікової документації обов'язково повинні входити дані не тільки стосовно історично-мистецької значущості, стану збереження, загальних просторових та функціональних характеристик, а і проведених комплексних досліджень. Під ними маються на увазі розвідки фахівців різного профілю, зокрема, істориків, мистецтвознавців, архітекторів, будівельників, геодезистів, економістів, управлінців і т. д.

Об'єднуючим чинником для всіх них є опрацьовувана архітектурна пам'ятка, яку неможливо автентично відтворити без її точних геометричних параметрів форми, розмірів і положення. Навіть для економістів та управлінців, не кажучи вже про попередньо перелічених спеціалістів, акцентовані фактори відіграють істотну роль, оскільки суттєво впливають, наприклад, на фінансові витрати для збереження й відновлення культурної спадщини.

Тому в цій публікації проаналізовано деякі аспекти методології використання геометричного моделювання, спрямованої на вирішення розглянутої проблеми.

Ключові слова: архітектурні об'єкти; геометричне моделювання; культурна спадщина України; комп'ютерне формоутворення; BIM технології.

Постановка проблеми. Нинішній етап розвитку України характеризується важкими воєнними випробуваннями. Це стосується загибелі та каліцтва людей, знищення природних ресурсів, матеріальних цінностей, Не винятком є й архітектурна спадщина нашої держави. Питання її збереження та відновлення обумовлюють важливу проблему, вдале подолання якої сприятиме укріпленню національної самосвідомості українського народу, розвитку освіти, туризму, духовному збагаченню людей.

Найдавнішими історичними архітектурними пам'ятками України є православні християнські храми Русі. Багато з них зазнало руйнувань унаслідок ординського нашествия в XIII ст. Деякі були відновлені в XIV–XVII ст. У цей і подальший час зводилися нові сакральні та цивільні будівлі, інші споруди, які зараз являють собою об'єкти культурної спадщини. Теперішній стан їхнього збереження доволі різний. З позицій відновлення, особливо в аспекті забезпечення автентичності попередніх періодів, критичність існуючої ситуації нерідко полягає у відсутності достатньо повної належної інформації. Давніми літописними джерелами вона представлена лише в обмеженій вербальній формі. Для середньовічних документів характерна поява спрощеного більш точного графічного подання, яке потім вдосконалювалось і вже у XVIII–XIX ст. отримало вигляд повноцінних креслеників. За допомогою них забезпечується можливість достатньо якісного відтворення будівель і споруд. Ці засоби надалі доповнюються фотографіями та документальними фільмами. Але, складність полягає не тільки в частій втраті таких матеріалів, а й у тому, що до другої половини XX ст. в багатьох випадках не підтримувалась актуальна поетапна відповідність наявних креслень та здійснюваних перебудов архітектурних об'єктів. Однак, варто зауважити, що в нинішній період стрімкого розвитку комп'ютерних інформаційних технологій розглянуті обставини змінюються на краще.

Аналіз досліджень та публікацій. Засади збереження культурної спадщини України викладено в законі [1], який регулює правові, організаційні, соціальні та економічні відносини вказаної діяльності. Призначення нормативного документа [2] полягає в дотриманні необхідних правил виконання реставраційних, консерваційних і ремонтних робіт. Державні будівельні норми [3] регламентують склад і зміст науково-проектної документації на реставрацію пам'яток архітектури та містобудування. У праці [4] аналізується сутність, етапи становлення, перспективи розвитку інформаційного моделювання в будівництві, тобто BIM (Building Information Modeling) технологій. Акцентується, що їхньою

основою слугують тривимірні (3D) комп'ютерні параметричні геометричні моделі. Шлях цієї прогресивної методології пролягав від виконаних вручну креслеників, потім отриманих автоматизовано двовимірних (2D) технічних документів і далі до 3D віртуальних реалістичних проєктних об'єктів. Потреба забезпечення ефективної роботи з великими масивами різноманітних даних, пов'язаних із промисловою продукцією, обумовила виникнення комп'ютерних систем PLM (Product Lifecycle Management) керування її життєвим циклом. Інтеграція перелічених вище засобів становить головну ідею BIM.

У публікації [5] наведено застосування цієї методології для догляду за архітектурними об'єктами. Дослідження [6] присвячено тривимірним зйомкам лазерним скануванням та фотограмметрією з отриманням хмар точок для створення комп'ютерних моделей будівель. У праці [7] виконано аналіз багатьох робіт із НВІМ (Historic/Heritage Building Information Modeling), тобто інформаційного моделювання будівель історичної спадщини. Підкреслено здатність такого підходу сприяти їхньому ефективному документуванню та збереженню. Зауважено, що все це реалізується в інтегрованих базах даних, організованих навколо 3D геометричних моделей архітектурних об'єктів. Показано відмінність між BIM та НВІМ, яка стосується того, що перші технології зосереджуються на проектуванні, зведенні, експлуатації нових будівель і споруд, а другі – на збереженні та відновленні існуючих, які мають культурну цінність. У статті [8] представлено напрямок формування бібліотек параметричних геометричних прототипів для комп'ютерного моделювання історичних будівельних об'єктів на основі хмар точок, отриманих лазерним скануванням і фотограмметрією.

Видання [9] аналізує застосування BIM для реставрації пам'яток архітектури, пошкоджених унаслідок воєнних дій, зокрема на території України. Зазначається, що такі методики дозволяють злагоджено працювати різним фахівцям, мати якісну документацію, додавати до неї необхідні відомості під час роботи на об'єктах, подальшого нагляду за ними. При цьому головними складовими BIM технологій є 3D геометричні моделі будівель і споруд та відповідні бази даних, які містять докладний належний опис. Акцентується, що для відновлення архітектурних пам'яток важливе ретельне порівняння поточного їхнього стану, відтвореного сканованими хмарами точок, і виконаних раніш еталонних комп'ютерних 3D геометричних моделей. Також констатується, що на практиці доволі часто відсутня повна розглянута документація навіть для видатної історичної архітектури нашої держави. Широке впровадження НВІМ дозволяє вирішувати наведену проблему.

Цілі та завдання статті полягають у викладенні деяких аспектів методології застосування засобів геометричного моделювання для збереження й відновлення архітектурних об'єктів культурної спадщини України.

Основна частина. Культурна спадщина суттєво сприяє формуванню ідентичності будь-якого народу, його національної гідності, самоповаги. Цей фактор особливо важливий на нинішньому важкому етапі розвитку нашої держави. Архітектурні об'єкти, представлені окремими будівлями, спорудами або їхніми частинами, на засадах системного підходу необхідно обов'язково розглядати в більш широкому аспекті взаємодії з оточуючим середовищем. Маються на увазі належні комплекси, як групи об'єднаних певним чином будівель і споруд, розташованих на деякій території. Типовими такими зразками слугують монастирські, садибні, палацово-паркові ансамблі, фортеці, майдани, вулиці тощо. Зауважимо, що до пам'яток архітектури також відносяться не тільки комплекси, а й композиційно не пов'язані будівлі та споруди різних стилів, періодів зведення, історично-мистецької цінності, але які з точки зору охорони культурної спадщини являють собою єдине ціле. Отже, засоби геометричного моделювання повинні забезпечувати ефективне розробляння планів розташування пам'яток у населених пунктах або природному ландшафті.

Надалі важливий момент формоутворення полягає в якісному визначенні існуючої об'ємно-просторової композиції архітектурного об'єкта, характеру наявних рішень фасадів та інтер'єрів, їхнього опорядження. Вихідними даними для цього слугують виконані обміри (*схематичні, архітектурні, архітектурно-археологічні, фотограмметричні*), що згідно з виданням [3] різняться своєю точністю. Перші є спрощеною графічною фіксацією об'єкта з метою створення загального уявлення про нього, дефініції площ та об'ємів. Другі – це докладна геометрична інформація про пам'ятку або її частини, які перебувають у задовільному стані та не мають значних історичних нашарувань. Архітектурно-археологічні обміри застосовуються для поглибленої графічної фіксації пам'ятки з урахуванням виявлених історичних нашарувань. Фотограмметричні виконуються за допомогою геодезичних приладів, лазерного сканування і т. д., тобто дистанційними інструментальними засобами при труднощах здійснення обмірів вручну через недоступність опрацьовуваних об'єктів.

Результати проведених обмірів пам'ятки слугують підґрунтям для розробляння її креслеників (планів, фасадів, перерізів) та 3D геометричних комп'ютерних моделей, які доповнюються матеріалами фотофіксації. До останніх входять відповідні схеми, альбоми з фотографіями й необхідними анотаціями прилеглої території, загального вигляду будівлі або споруди, її фасадів, інтер'єру, інших елементів. Перераховані дані, разом з історичними відомостями, описом мистецької цінності пам'ятки та її стану, іншою інформацією, являють основу дефініції автентичності архітектурного об'єкта культурної спадщини, визначення заходів для його збереження або відновлення. Якісне автоматизоване документування в середовищі НВІМ значною мірою сприяє вирішенню цих питань.

Перспективним напрямком для обмірів історичних будівель і споруд є тривимірне сканування та фотограмметрія. Перетворення отримуваних хмар точок у неперервні векторні фігури, притаманні ВІМ технологіям, у виданні [8] пропонується реалізовувати завдяки типовим параметричним архітектурним елементам. Зазначений процес містить *три* етапи. *Перший* зводиться до дистанційних зйомок за допомогою лазерних сканерів і фотограмметрії. *Другий* включає розробляння з використанням GDL (Geometric Descriptive Language) системи ArchiCAD належних бібліотек елементів. *Третій* полягає в розміщенні гнучких параметричних фігур у сканованих хмарах точок для формування комп'ютерної 3D моделі будівлі або споруди, внесенні багатоманітної додаткової інформації.

Розробляння типових геометричних об'єктів спирається на виконаний докладний архітектурний аналіз історичних документів. Важлива також якісна сегментація вихідної хмари точок, як необхідна умова подальшого успішного параметричного моделювання. Головну мету становить автоматизація отримання документації у вигляді 2D креслеників і 3D геометричних моделей. Використання даного підходу показано на прикладі колон класичних архітектурних ордерів. Акцентовано важливість дослідження історичних правил формоутворення таких будівельних елементів, як стіни, перекриття, вікна, двері та їхнього оздоблення.

Вихідна хмара точок, зазвичай, потребує певного обробляння, що включає видалення помилкових даних, об'єднання інформації, отриманої з різних позицій спостереження, побудову полігональних поверхонь, надання їм текстури. Потім виконується сегментація для виділення поверхів, фасадів, розрізів тощо. Координати та розміри конструкційних елементів обчислюються з хмари точок. 3D моделювання, наприклад фасаду, може здійснюватися в такій послідовності: спочатку стіни, далі необхідні прорізи, на завершення вікна і двері.

Публікацію [10] присвячено систематизації архітектурних традицій православних храмів Чернігівщини з метою їхнього збереження, відбудови, якісного зведення нових. Цього пропонується досягати застосуванням методології структурно-параметричного геометричного моделювання. Роботами [11–13] аналізується відповідне варіантне комп'ютерне формоутворення куполів храмів. Уявлення про нього надають рис. 1 ... рис. 3. У даних працях подано також належний математичний апарат для обчислення різноманітних властивостей (площ, об'ємів, розгорток і т. д.) вказаних об'єктів.

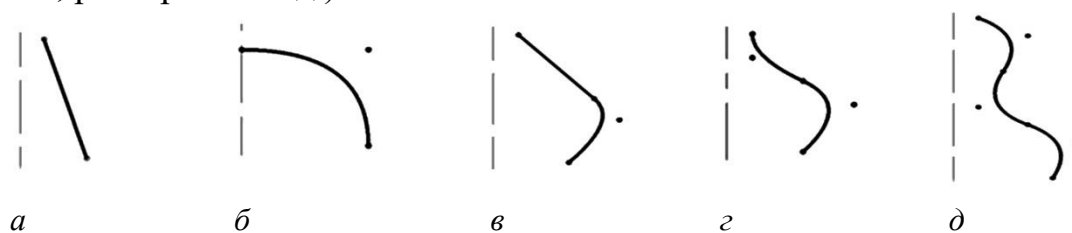


Рис 1. Твірні контури поверхні купола:

a – конічного; *б* – яйцеподібного; *в* – маківки; *г* – цибульчастого; *д* – грушоподібного

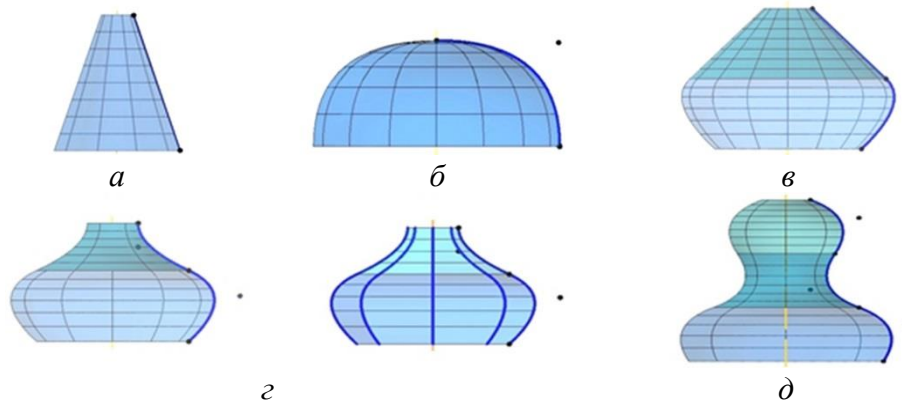


Рис 2. Поверхня купола:
a – конічна; *б* – яйцеподібна; *в* – маківка; *г* – цибульчата гладка та гранчаста;
д – грушоподібна

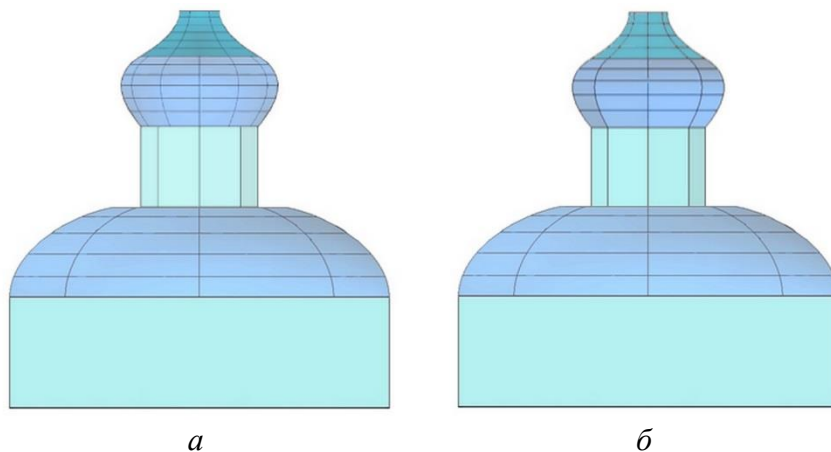


Рис 3. Різновиди двоярусного банного завершення храму
з яйцеподібним нижнім куполом і цибульчастим верхнім:
a – гладким; *б* – гранчастим

Відомо, що основні об'ємно-планувальні рішення православних храмів значною мірою визначаються застосованим архітектурним стилем. Однак, належну їхню індивідуальність забезпечують більш дрібні конструкційні та декоративні складові. Тому змінювання форми, розмірів, положення, кількості, інших особливостей останніх достатньо важливе для естетичного сприйняття зазначених сакральних будівель. Поширенішими конструкційно-декоративними елементами християнських храмів є різноманітні двері та вікна. На рис. 4 показано кілька типових зразків їхньої зовнішньої форми. Для комп'ютерного формоутворення наведених об'єктів доволі продуктивний структурно-параметричний підхід, поданий у виданнях [11–13] для куполів храмів.

Таким чином, нами проаналізовано деякі базові аспекти використання засобів геометричного моделювання для збереження та відновлення архітектурної культурної спадщини України. З метою покращення ефективності зазначених процесів пропонується поширити на

розглянуту сферу способи, прийоми й алгоритми структурно-параметричної методології. Це може становити важливий предмет подальших наукових розвідок.

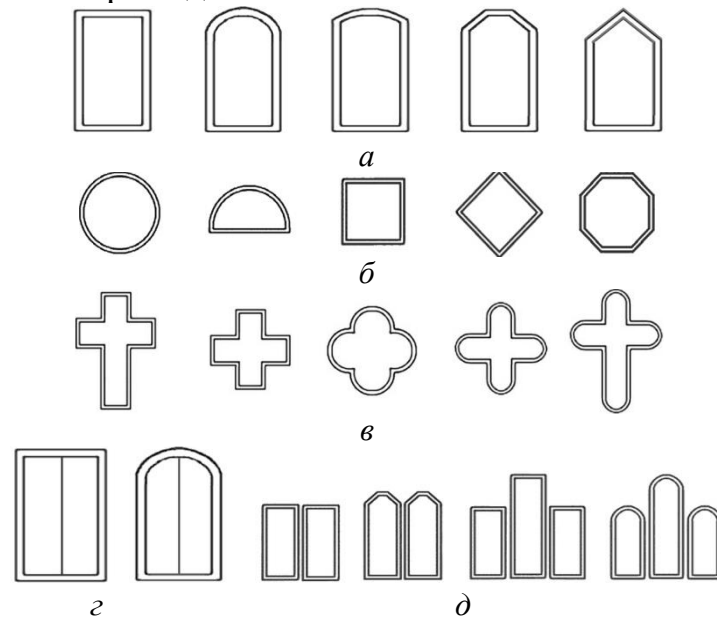


Рис 4. Варіанти:

a – звичайних дверей і вікон; *б* – інших простих вікон; *в* – хрестоподібних вікон;
г – двостулкових дверей; *д* – подвійних та потрійних вікон

Висновки та перспективи досліджень. Даною публікацією обґрунтовано важливість на нинішньому етапі розвитку нашої держави залучення сучасних комп'ютерних графічних засобів для вирішення такої актуальної проблеми, як збереження та відновлення об'єктів архітектурної спадщини України. Маються на увазі BIM технології, наприклад у середовищі систем ReCap Pro та Revit фірми Autodesk, доповнені належним новим математичним забезпеченням, зокрема створеним на засадах методології структурно-параметричного моделювання. Однак, це потребує багатьох зусиль у різних сферах. Наприклад, щодо дослідження, систематизації та узагальнення формоутворення архітектурних пам'яток із розробленням відповідних універсальних і спеціалізованих геометричних моделей, побудови на основі них сімейств гнучких комп'ютерних типових конструкційних елементів, визначення методик продуктивного автоматизованого опрацювання сканованих хмар точок із метою отримання якісних 3D моделей історичних будівель і споруд.

Література

1. Про охорону культурної спадщини. Закон України від 08.06.2000 р. № 1805-III, Редакція від 15.11.2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1805-14#Text> (дата звернення: 18.11.2024).
2. ДБН В.3.2-1-2004. Реставраційні, консерваційні та ремонтні роботи на пам'ятках культурної спадщини. Київ: Держбуд України, 2005. 124 с.
3. ДБН А.2.2-14:2016. Склад та зміст науково-проектної документації на

реставрацію пам'яток архітектури та містобудування. Зі зміною № 1. Київ: Міністерство розвитку громад та територій України, 2022. 35 с.

4. *Trach P. V.* Інформаційне моделювання в будівництві (BIM): сутність, етапи становлення та перспективи розвитку. *Глобальні та національні проблеми економіки*. 2017. Вип. 16. С. 490–495.

5. *Vitasek S.* The use of the BIM method for sustainable care of historic buildings: Methodological framework. *SHS Web of Conferences*. 2022. Vol. 132, 01023. DOI: 10.1051/shsconf/202213201023

6. *Matellon A., Maset E., Beinat A., Visintini D.* Surface reconstruction from SLAM-based point clouds: results from the datasets of the 2023 SIFET benchmark. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16(18), 3439. DOI: 10.3390/rs16183439

7. *Penjor T., Banihashemi S., Hajirasouli A., Golzad H.* Heritage building information modeling (HBIM) for heritage conservation: framework of challenges, gaps, and existing limitations of HBIM. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*. 2024. Vol. 35, e00366. DOI: 10.1016/j.daach.2024.e00366

8. *Murphy M., McGovern E., Pavia S.* Historic building information modelling – adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2013. Vol. 76. P. 89–102. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.11.006

9. *Білов В. А.* Інноваційні методи використання будівельного інформаційного моделювання (BIM) у процесі реставрації пам'яток архітектури, пошкоджених внаслідок воєнних дій. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*, 2023. Вип. 6. С. 230–239. DOI: 10.32782/tnv-tech.2023.6.26

10. *Вірченко Г. А., Мартинов В. Л., Терещук М. О.* До питання архітектурного формоутворення православних храмів Чернігівщини. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. 2023. Вип. 105. С. 53–61. DOI: 10.32347/0131-579x.2023.105.53-61

11. *Терещук М. О.* Структурно-параметричний спосіб формоутворення куполів православних храмів. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. 2022. Вип. 103. С. 201–208. DOI: 10.32347/0131-579x.2022.103.201-208

12. *Терещук М. О.* Структурно-параметричні геометричні моделі поверхонь куполів православних храмів. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2022. Вип. 5.1. С. 95–100. DOI: 10.32782/mathematical-modelling/2022-5-1-12

13. *Вірченко Г. А., Терещук М. О.* Деякі аспекти застосування геометричних моделей для проєктування куполів православних храмів. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*, 2024. Вип. 106. С. 57–66. DOI: 10.32347/0131-579x.2024.106.57-66

References

1. Pro okhoronu kulturnoi spadshchyny. Zakon Ukrainy vid 08.06.2000 r. №

- 1805-III, Redaktsiia vid 15.11.2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1805-14#Text> (data zvernennia: 18.11.2024). {in Ukrainian}
2. DBN V.3.2-1-2004. Restavratsiini, konservatsiini ta remontni roboty na pamiatkakh kulturnoi spadshchyny. Kyiv: Derzhbud Ukrainy, 2005. 124 s. {in Ukrainian}
 3. DBN A.2.2-14:2016. Sklad ta zmist naukovo-proektnoi dokumentatsii na restavratsiiu pamiatok arkhitektury ta mistobuduvannia. Zi zminoiu № 1. Kyiv: Ministerstvo rozvytku hromad ta terytorii Ukrainy, 2022. 35 s. {in Ukrainian}
 4. *Trach R. V.* Informatsiine modeliuвання v budivnytstvi (BIM): sutnist, etapy stanovlennia ta perspektyvy rozvytku. *Hlobalni ta natsionalni problemy ekonomiky*. 2017. Vyp. 16. S. 490–495. {in Ukrainian}
 5. *Vitasek S.* The use of the BIM method for sustainable care of historic buildings: Methodological framework. *SHS Web of Conferences*. 2022. Vol. 132, 01023. DOI: 10.1051/shsconf/202213201023 {in English}
 6. *Matellon A., Maset E., Beinat A., Visintini D.* Surface reconstruction from SLAM-based point clouds: results from the datasets of the 2023 SIFET benchmark. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16(18), 3439. DOI: 10.3390/rs16183439 {in English}
 7. *Penjor T., Banihashemi S., Hajirasouli A., Golzad H.* Heritage building information modeling (HBIM) for heritage conservation: framework of challenges, gaps, and existing limitations of HBIM. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*. 2024. Vol. 35, e00366. DOI: 10.1016/j.daach.2024.e00366 {in English}
 8. *Murphy M., McGovern E., Pavia S.* Historic building information modelling – adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2013. Vol. 76. P. 89–102. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.11.006 {in English}
 9. *Bilov V. A.* Innovatsiini metody vykorystannia budivelnoho informatsiinoho modeliuвання (BIM) u protsesi restavratsii pamiatok arkhitektury, poshkodzhennykh vnaslidok voiennykh dii. *Tavriiskyi naukovyi visnyk. Serii: Tekhnichni nauky*, 2023. Vyp. 6. S. 230–239. DOI: 10.32782/tnv-tech.2023.6.26 {in Ukrainian}
 10. *Virchenko G. A., Martynov V. L., Tereshchuk M. O.* Do pytannia arkhitekturnoho formoutvorennia pravoslavnykh khramiv Chernihivshchyny. *Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika*. 2023. Vyp. 105. S. 53–61. DOI: 10.32347/0131-579x.2023.105.53-61 {in Ukrainian}
 11. *Tereshchuk M. O.* Strukturno-parametrychnyi sposib formoutvorennia kupoliv pravoslavnykh khramiv. *Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika*. 2022. Vyp. 103. S. 201–208. DOI: 10.32347/0131-579x.2022.103.201-208 {in Ukrainian}
 12. *Tereshchuk M. O.* Strukturno-parametrychni heometrychni modeli poverkhon kupoliv pravoslavnykh khramiv. *Prykladni pytannia matematychnoho modeliuвання*. 2022. Vyp. 5.1. S. 95–100. {in Ukrainian}
 13. *Virchenko G. A., Tereshchuk M. O.* Deiaki aspekty zastosuvannia heometrychnykh modelei dlia proiektuvannia kupoliv pravoslavnykh khramiv.

Doctor of Philosophy **Mykola Tereschuk**,
nikolatereschuk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4444-3677
Kyiv National University of Construction and Architecture

SOME ASPECTS OF APPLICATION OF GEOMETRIC MODELING FOR PRESERVATION AND RESTORATION OF ARCHITECTURAL HERITAGE OF UKRAINE

Ukraine's difficult present is connected with military operations on its territory. This leads to the death of people, their injuries, great material damage, significant destruction, and other losses. The cultural heritage of our state, in particular the corresponding architectural objects, is no exception. Therefore, their preservation and subsequent restoration after the advent of peace is an urgent problem.

The timely accumulation various information for successful performance of the specified tasks is especially important. Architecture is the basis of immovable cultural heritage, it includes individual buildings, structures, their complexes, as well as territories that have brought a certain historical and artistic value to the present day and have preserved their authenticity. In these conditions, the protection of architectural monuments plays a key role as a holistic system of legal, organizational, material and technical, urban planning, financial and other measures aimed at identifying, researching, restoring, repairing, etc., the specified heritage.

To solve the above issues, it is necessary to have comprehensive, detailed information about each such object. Its accounting documentation must include data not only on the historical and artistic significance, state of preservation, general spatial and functional characteristics, but also on the comprehensive studies carried out. They refer to the research of specialists of various profiles, in particular, historians, architects, builders, surveyors, economists, managers, etc.

The unifying factor for all of them is the historical architectural object being worked on, which cannot be authentically reproduced without its precise geometric parameters of shape, size and position. Even for economists and managers, not to mention the previously listed specialists, the accentuated factors play a significant role, since they influence, for example, the financial costs of preserving and restoring cultural heritage.

Therefore, this publication analyzes some aspects of the methodology for using geometric modeling aimed at solving the problem under consideration.

Key words: architectural objects; geometric modeling; cultural heritage of Ukraine; computer shaping; BIM technologies.