

будівництва.

Ключові слова: *геометричне моделювання; фортифікаційні споруди; просторова структура; планувальна організація; геоінформаційні системи; інформаційне моделювання будівель; енергоефективність.*

Вступ. Сучасні умови розвитку будівництва та оборонної інженерії висувають підвищені вимоги до проектування фортифікаційних об'єктів. Такі споруди повинні забезпечувати не лише надійний захист і функціональність, але й швидке розгортання, можливість безпечного переміщення персоналу, ефективну логістику та раціональне використання матеріальних і енергетичних ресурсів. У цих умовах важливого значення набуває геометрія фортифікаційних позицій, оскільки саме форма, просторова структура та планувальна організація значною мірою визначають ефективність їх експлуатації.

Геометричні параметри фортифікаційних об'єктів безпосередньо впливають на довжину маршрутів переміщення, допустимі ухили проходів, конфігурацію стикувань між елементами, а також на обсяги земляних робіт та витрати матеріалів під час будівництва. У свою чергу, ці параметри визначають енерговитрати, трудомісткість робіт та загальну результативність створення фортифікаційної позиції

Незважаючи на наявність значної кількості нормативних документів та інженерних рішень, у практиці проектування все ще відчувається нестача комплексних методик, які б поєднували геометричне формування із системою перевірок та оцінювання експлуатаційних показників. Традиційний підхід, який базується на використанні типових конструктивних рішень або стандартних вузлів, не завжди дозволяє ефективно адаптувати проєкт до конкретних природних умов місцевості.

У зв'язку з цим актуальним є розроблення методології, яка дозволяє розглядати фортифікаційну позицію як єдину просторову систему взаємопов'язаних елементів, що відповідає сучасним підходам до моделювання складних просторових систем [1]. У межах такого підходу уніфікація здійснюється на рівні топології системи, тоді як конкретні геометричні параметри визначаються індивідуально для кожного майданчика з урахуванням рельєфу, інженерно-геологічних умов та наявних обмежень.

Важливу роль у формуванні таких моделей відіграють сучасні цифрові технології. Геоінформаційні системи дають змогу отримувати детальні дані про рельєф, гідрологію, існуючу забудову та інші просторові характеристики території, що широко використовується у сучасних просторових дослідженнях [2; 3].

Таким чином, розроблення методологічних засад геометричного моделювання фортифікаційних об'єктів є важливим науковим і практичним завданням, яке спрямоване на підвищення ефективності проектування, скорочення ресурсних витрат та покращення експлуатаційних характеристик оборонних позицій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нормативне поле, у межах якого приймаються проєктні рішення для фортифікаційних об'єктів в

Україні, задають державні будівельні норми з цивільного захисту, надійності та навантажень. ДБН В.2.2-5:2023 окреслює функціонально-планувальні та експлуатаційні вимоги до захисних споруд цивільного захисту (прохідність, евакуаційні параметри, режими експлуатації) і фактично формує нижню межу геометричних та просторових характеристик для елементів мережі ходів сполучення [4]. Принципи надійності та перевірок за граничними станами, що впливають на допуски геометрії, встановлено ДБН В.1.2-14:2018 [5], а спектр навантажень і впливів, які транслюються у планувальні та конструктивні обмеження, - ДБН В.1.2-2:2006 [6]. Сукупно ці документи створюють рамку, в межах якої геометричні параметри (ширини, ухили, радіуси, мінімальні відстані) мають інтерпретуватися як жорсткі або напівжорсткі обмеження для подальшого моделювання.

Систематизований огляд типології фортифікаційних споруд і практики інженерного забезпечення подано у монографії Національної академії сухопутних військ, де узагальнено функції елементів, їхню просторову організацію та взаємодію із місцевістю. Ці напрацювання доцільно використовувати як каталог планувальних ролей та взаємозв'язків вузлів, а не як готові геометричні форми для безумовного перенесення у модель [7].

Практико-орієнтовані джерела з цивільного захисту деталізують технологічні аспекти зведення, експлуатації та обслуговування, що безпосередньо конвертуються у проектні ліміти: допустимі ухили, мінімальні габарити проходів, вимоги до вентиляції, огляду, безпечної евакуації та ремонтпридатності. Комплексні рекомендації з організації та утримання захисних споруд пропонують збалансовані геометрично-технологічні допуски, релевантні для параметризації на мікро- та мезорівнях [8]. Дослідження з будівництва дрібних захисних фортифікаційних споруд (зокрема залізобетонних бліндажів) демонструють, як типові вузли транслюються у конкретні геометричні обмеження та монтажні ліміти, що важливо враховувати як «межі допустимості», а не як шаблонні форми [9].

Українські роботи з прямого динамічного розрахунку конструкцій під дією повітряної ударної хвилі надають апробовані схеми чисельної верифікації локальних елементів із використанням вітчизняних програмних комплексів. У контексті геометричного моделювання такі результати корисні як джерело параметрів для перевірок та калібрування мінімальних геометричних вимог без занурення у деталі конструювання [10]. Комплементарно, дослідження з вибухових технологій у геонженерії окреслюють вплив конфігурації ґрунтових масивів і оболонок на розповсюдження хвилі та енергопоглинання, що підсилює аргументацію на користь раціональної кривини та плавних переходів форм [11].

У блоці надійності та резервування українські видання з розрахунку надійності будівельних конструкцій узагальнюють підходи до врахування невизначеностей, що у геометричній постановці інтерпретується як робастність до варіацій місцевості та експлуатаційних умов. Це підтримує ідею уніфікації на рівні топології із збереженням сайтоорієнтованої

геометрії [12].

Геопросторову основу для формування «дозволених областей» розміщення вузлів і коридорів трасування забезпечують українські напрацювання з геоінформаційних систем і морфоаналізу рельєфу. Вони пропонують відтворені процедури отримання цифрових моделей рельєфу, масок заборонених зон, оцінювання ухилів і експозицій, що безпосередньо переносяться у геометричні допуски на макрорівні планувальної організації [13].

Щодо інструментальної реалізації, українські публікації з впровадження інформаційного моделювання будівель у навчальні та проєктні процеси демонструють, як параметрична геометрія може бути пов'язана з автоматизованими перевірками, випуском відомостей та документуванням. Це створює технологічну базу для наскрізного процесу «дані – геометрія – перевірки – документація» без перетворення статті на огляд суміжних інженерних підсистем [13; 14].

Отже, вітчизняна нормативна та науково-практична база достатньо повно задає вимоги до функціональності, безпеки та технологічності фортифікаційних об'єктів. Водночас відчутною залишається прогалина у цілісній геометричній методології, де уніфікація здійснюється лише на рівні топологічних схем, а конкретні геометричні параметри визначаються сайтоорієнтовано на основі геоінформаційних даних і підтверджуються чисельними перевірками. Саме на закриття цієї прогалини спрямована пропонована в статті постановка. Таким чином, існуючі дослідження формують теоретичну та нормативну основу для розроблення нових підходів до геометричного моделювання фортифікаційних систем.

Метою статті є розроблення методологічних засад геометричного моделювання фортифікаційних об'єктів, які забезпечують кероване формоутворення без занурення у деталі суміжних інженерних підсистем. Запропонований підхід спирається на три взаємопов'язані рівні опису. На мікрорівні розглядаються геометричні параметри форми: кривини оболонки і насипів, мінімальні радіуси зламів, допустимі ширини та ухили проходів, локальні переходи, що впливають на прохідність, вентиляційні та евакуаційні властивості. На мезорівні аналізуються просторові структури: вузли стикування та роз'їзди, пояси жорсткості, геометрія зв'язків між елементами, конфігурації, що забезпечують пропускну здатність і відмовостійкість. На макрорівні формують планувальну організацію позиції: мережу ходів сполучення, взаємне розміщення укриттів, вогневих точок, складів і пунктів евакуації, буферні та охоронні пояси, коридори маскування..

Виклад основного матеріалу. Проєктування фортифікаційних об'єктів пов'язане з необхідністю одночасного врахування великої кількості геометричних, функціональних і технологічних параметрів. У традиційній практиці такі рішення часто приймаються на основі типових конструктивних схем або окремих інженерних рішень, що не завжди забезпечує оптимальну адаптацію споруд до конкретних умов місцевості. У зв'язку з цим доцільним є використання системного підходу, у межах

якого фортифікаційна позиція розглядається як просторово організована мережа взаємопов'язаних елементів.

У межах запропонованого підходу фортифікаційна позиція описується як геометрично-топологічна система, що складається з вузлів і з'єднань між ними. Вузли відповідають функціональним елементам позиції – укриттям, вогневим точкам, складам, пунктам евакуації або логістичним вузлам. З'єднання між вузлами представляють собою ходи сполучення або транспортні маршрути, які забезпечують переміщення особового складу, техніки та матеріальних ресурсів.

Формування геометричної структури позиції здійснюється з урахуванням даних про природні та інженерні умови території. Основним джерелом такої інформації виступають геоінформаційні системи, які дозволяють отримувати цифрові моделі рельєфу, дані про гідрологічні умови, існуючу забудову, а також інформацію про обмежені або небезпечні зони. На основі цих даних формуються так звані дозволені області розміщення вузлів, у межах яких можливе будівництво елементів фортифікаційної позиції.

Для опису геометричної структури системи використовується багаторівнева модель, яка включає три основні рівні: мікрорівень, мезорівень і макрорівень.

На мікрорівні розглядаються локальні геометричні параметри елементів, такі як ширина проходів, допустимі ухили, радіуси заокруглення, а також конфігурація переходів між окремими ділянками. Ці параметри безпосередньо впливають на прохідність ходів сполучення, можливість переміщення техніки, а також на безпечну евакуацію персоналу.

Мезорівень описує просторову структуру позиції на рівні взаємодії окремих елементів. До цього рівня належать вузли стикування маршрутів, роз'їзди, переходи між різними функціональними зонами, а також елементи, що забезпечують резервування маршрутів. Саме на цьому рівні формується просторовий каркас позиції, який визначає її пропускну здатність та стійкість до пошкоджень.

Макрорівень характеризує загальну планувальну організацію фортифікаційної позиції. Він включає схему розміщення функціональних зон, конфігурацію мережі ходів сполучення, взаємне розташування укриттів, складів, пунктів евакуації та інших елементів. На цьому рівні визначається логіка переміщення ресурсів і персоналу, а також забезпечується можливість резервування маршрутів у разі пошкодження окремих ділянок мережі.

Алгоритм формування геометричної моделі складається з кількох послідовних етапів. На першому етапі здійснюється підготовка геопросторових даних, включаючи побудову цифрової моделі рельєфу та визначення зон обмежень. На другому етапі формується початкова топологічна схема позиції, яка визначає можливі зв'язки між вузлами системи. Далі виконується параметризація геометричних характеристик елементів мережі, після чого проводиться перевірка відповідності

отриманих рішень нормативним та технологічним вимогам. Загальна структура алгоритму моделювання представлена на рис. 1.

Важливим етапом є оптимізація конфігурації позиції. У процесі оптимізації аналізуються такі показники, як довжина маршрутів переміщення, допустимі ухили, пропускна здатність мережі та обсяги земляних робіт. На основі отриманих результатів виконується коригування розташування вузлів і траєкторій маршрутів.



Рис. 1. Алгоритм геометричного моделювання фортифікаційної позиції

Приклад геометрично-топологічної моделі фортифікаційної позиції показано на рис. 2.

Етапи геометричного моделювання. Процес геометричного моделювання фортифікаційної позиції реалізується як послідовність взаємопов'язаних етапів. На першому етапі здійснюється підготовка геопросторових даних, що включає побудову цифрової моделі рельєфу, формування карт ухилів, а також визначення зон обмежень і буферних областей.

На другому етапі формується початкова топологічна схема мережі. Для цього визначаються фіксовані вузли системи (пункти евакуації, склади, укриття) та генеруються можливі вузли-кандидати у дозволених областях території.

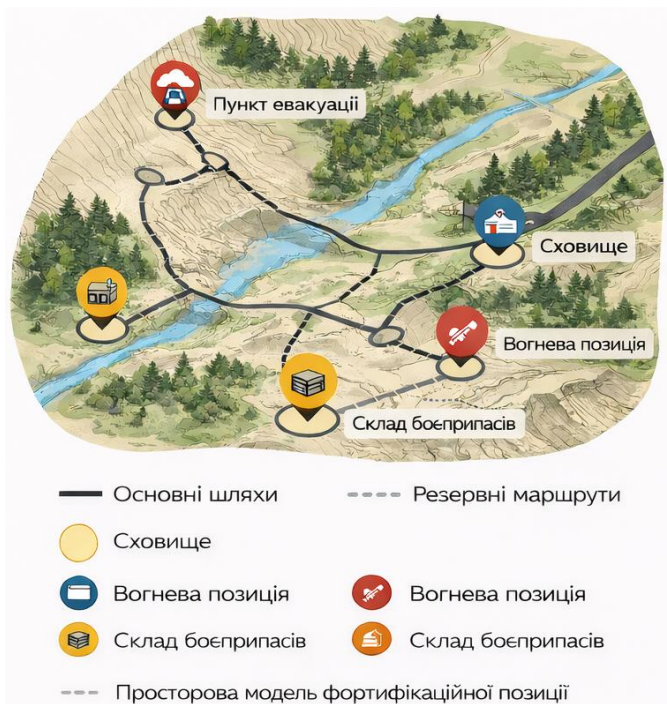


Рис. 2. Геометрично-топологічна модель фортифікаційної позиції

Наступний етап передбачає параметризацію геометричних характеристик елементів мережі. Для кожної ділянки встановлюються довжина, допустимий ухил, ширина проходів, радіуси заокруглення та інші параметри, що впливають на прохідність і безпечність переміщення.

Далі виконується пошук оптимальних маршрутів між критичними вузлами системи. У межах цього етапу визначаються потенційні вузькі місця мережі, зокрема ділянки з перевищенням допустимих ухилів або надмірною кривиною траєкторій.

На завершальному етапі проводиться перевірка отриманих рішень за системою геометричних, технологічних та ресурсних критеріїв, після чого результати передаються до середовища інформаційного моделювання будівель для формування проектної документації.

Запропонований підхід дозволяє інтегрувати процес геометричного моделювання з технологіями інформаційного моделювання будівель. Це забезпечує автоматизоване формування планів, поздовжніх профілів, відомостей обсягів робіт і специфікацій матеріалів. Таким чином, створюється наскрізний процес, що поєднує аналіз просторових даних, геометричне моделювання та підготовку проектної документації.

Використання такого підходу сприяє підвищенню ефективності планування фортифікаційних позицій. Рациональна конфігурація мережі дозволяє зменшити довжину маршрутів, оптимізувати обсяги земляних робіт і скоротити витрати матеріалів та енергії. У результаті підвищується як економічна ефективність будівництва, так і експлуатаційна надійність фортифікаційних споруд.

Для демонстрації можливостей запропонованого підходу розглянуто умовну територію площею один квадратний кілометр, що включає елементи складного рельєфу, зокрема яр, водотік, лісову ділянку та автомобільну дорогу місцевого значення.

У межах цієї території визначено один фіксований пункт евакуації та чотири потенційні вузли системи: укриття, склад матеріальних ресурсів та дві вогневі позиції.

На основі цифрової моделі рельєфу сформовано систему можливих коридорів переміщення між вузлами. Первинний аналіз мережі дозволив виявити кілька проблемних ділянок, зокрема різкі повороти траєкторій та перевищення допустимих ухилів на окремих сегментах маршруту.

У процесі оптимізації конфігурації мережі було виконано коригування розташування однієї з вогневих позицій у межах дозволеної області. Це дозволило сформувати більш пологий маршрут і зменшити довжину критичних ділянок мережі.

У результаті оптимізації скоротився час доступу до пункту евакуації, зменшилися обсяги земляних робіт, а також було сформовано резервний маршрут, що підвищує стійкість системи до можливих пошкоджень.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у розвитку методологічних підходів до геометричного моделювання фортифікаційних об'єктів як складних просторових систем. Основні елементи новизни дослідження полягають у такому:

1. Запропоновано системний підхід до геометричного моделювання фортифікаційних об'єктів, у якому позиція розглядається не як сукупність окремих споруд, а як інтегрована просторово-мережева система взаємопов'язаних елементів.

2. Розроблено багаторівневу модель геометричної організації фортифікаційної позиції, що включає мікрорівень, мезорівень і макрорівень. Така структура дозволяє одночасно враховувати локальні геометричні параметри елементів, їхні просторові зв'язки та загальну планувальну організацію системи.

3. Обґрунтовано підхід до уніфікації фортифікаційних рішень на рівні топології, при якому стандартними є лише схеми зв'язків між елементами, тоді як конкретні геометричні параметри визначаються з урахуванням умов конкретної місцевості.

4. Запропоновано інтеграцію геометричного моделювання з геоінформаційними системами та технологіями інформаційного моделювання будівель, що дозволяє автоматизувати процес формування та перевірки проектних рішень.

5. Визначено систему експлуатаційних і ресурсних показників, які

дозволяють оцінювати ефективність геометричної конфігурації фортифікаційної позиції, зокрема довжину маршрутів переміщення, пропускну здатність мережі, обсяги земляних робіт та енергетичні витрати на будівництво.

Отримані результати створюють методологічну основу для подальшого розвитку цифрових підходів до проектування фортифікаційних об'єктів і можуть бути використані при розробленні систем підтримки прийняття інженерних рішень у сфері оборонного будівництва.

Перевірка, чутливість і практичні наслідки

- Аналіз чутливості до нормативних обмежень. Невелике зменшення допустимого ухилу може змінити вибір маршруту й збільшити довжину мережі, але зменшить ризик слизьких ділянок; ширина проходу з великою ймовірністю впливає на обсяг розробки ґрунту.

- Аналіз чутливості до змін експлуатаційних умов. У вологий період оптимальна конфігурація коридорів зміщується на більш щільні ґрунти або на ділянки з меншими ухілами; резервні маршрути стають більш затребуваними.

Вплив на енергоефективність. Коротші маршрути з помірними ухілами та достатніми радіусами поворотів прямо скорочують обсяги земляних робіт, транспортно-монтажні переміщення і витрати пального, що знижує вуглецевий слід розгортання позиції.

Висновки і перспективи подальших досліджень. У роботі сформовано методологічні засади геометричного моделювання фортифікаційних об'єктів, у яких рішення уніфікуються лише на рівні топології мережі, тоді як конкретні координати, кривини, ширини та ухили визначаються сайтоорієнтовано за даними місцевості.

Методика структурована на три взаємопов'язані рівні: мікрорівень (форма й локальні параметри), мезорівень (просторові вузли, роз'їзди, стикування), макрорівень (планувальна організація мережі ходів сполучення). Така декомпозиція забезпечує кероване формоутворення без занурення у суміжні підсистеми.

Сформульовано чітку нотацію параметрів і набір перевірок: геометрично-нормативні, просторові, ресурсно-технологічні, вимоги зв'язності/резервування та маскування. Кожен параметр має пояснення і одиниці виміру, що підвищує відтворюваність.

Інтегровано ГІС ↔ інформаційне моделювання будівель як наскрізний процес: від цифрової моделі рельєфу та масок заборон — до параметризації мережі, автоматизованих перевірок і підготовки проєктної документації.

Запропоновано експлуатаційні й ресурсні метрики верхнього рівня (час доступу, сумарні довжини, орієнтовні обсяги земляних робіт, тривалість зведення, показники експозиції), що напряму пов'язують геометрію з керованістю, живучістю та енергоефективністю.

Показано корисність сценарного підходу з зовнішнім зважуванням умов (сезонність, стан ґрунтів, режими маскування) без розгортання повних ризик-моделей, це дає гнучкість і не ускладнює базовий процес.

Демонстраційні схеми (блок-схема процесу, багаторівневі ілюстрації,

сценарні коридори) і шаблони таблиць забезпечують операційну застосовність методики у польових та проектних умовах.

Методика сприяє скороченню циклу «дані → гіпотеза → перевірка → документація», зменшує надлишкові земельні роботи та логістичні витрати, підвищує відтворюваність і масштабованість розгортання фортифікацій.

Подальші дослідження передбачають польове калібрування параметрів і валідацію на реальних ділянках, розширення моделі на резервування та пропускні здатності, динамічне перепланування при пошкодженнях, інтеграцію ліній видимості й цифрового двійника, а також оцінку енергетичних і вуглецевих наслідків різних конфігурацій.

Список використаних джерел

1. Batty M. The New Science of Cities. Cambridge : MIT Press, 2013. [10.1257/jel.52.3.805](https://doi.org/10.1257/jel.52.3.805).
2. Пичугін С. Ф. Розрахунок надійності будівельних конструкцій. Полтава : АСМІ, 2016. 284 с.
3. Goodchild M. Geographic Information Systems and Science. New York : Wiley, 2017.
4. ДБН В.2.2-5:2023. Будинки і споруди. Захисні споруди цивільного захисту. Київ : Мінрегіон України, 2023.
5. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Загальні принципи. Київ : Мінрегіон України, 2018.
6. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. Київ : Мінрегіонбуд України, 2006.
7. Д'яков В. М., Колос І. М., Верстівський В. Ф. Військові фортифікаційні споруди. Львів : Національна академія сухопутних військ, 2018. 368 с.
8. Гасенко А. та ін. Збірник наукових розробок, матеріалів і рекомендацій щодо споруд цивільного захисту. Полтава: Астроя, 2023. 304 с.
9. Безуглий Я. П., Отрош Ю. А., Майборода Р. І., Рашкевич Н. В. Будівництво дрібних захисних фортифікаційних споруд – залізобетонних бліндажів циліндричної форми заводського виготовлення. Вісті Донецького гірничого інституту. 2022. №51. С. 7–13. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2022-2-7-13>
10. Ромашкіна М., Пісаревський Б., Журавльов О. Розрахунок будівлі на вплив повітряної ударної хвилі прямим динамічним методом з використанням ПК ЛПА-САПР. Будівельні конструкції. Теорія і практика. 2024. №14. С. 147–160. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.14.2024.147-160>
11. Бойко В. В., Хань А. Л., Хань О. В. Спеціальні вибухові технології в геoinженерії. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 292 с.
12. Черваньов І. Г., Попов В. С. Досвід застосування ГІС-технологій для автоматичного аналізу морфології рельєфу за даними радарного знімання. Український географічний журнал. 2020. №3. С. 13–20. <https://doi.org/10.15407/ugz2020.03.013>

13. Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling. Hoboken : Wiley, 2018.
14. O'Rourke T., Toprak S. Infrastructure resilience and risk assessment. Natural Hazards Review. 2018.

Oleksii Kotliarevskyi

Methodological principles of geometric modeling of fortification structures: shape, spatial structures, and planning organization

The article examines the methodological principles of geometric modeling of fortification structures, in which the shape, spatial structure, and planning organization of positions are considered as an interconnected system of design decision-making. The relevance of the study is determined by the need for rapid and efficient design of fortification positions under complex natural and resource conditions, where the geometric parameters of structures directly influence their functionality, survivability, movement logistics, and energy consumption during construction and operation. The aim of the study is to develop a comprehensive methodology for the geometric modeling of fortification structures that integrates methods of applied geometry, geographic information systems, and building information modeling. The proposed approach is based on a multi-level spatial organization that includes the micro level (local geometric parameters of form), the meso level (nodes and spatial connections between elements), and the macro level (the planning organization of the network of communication passages and functional zones). The study proposes a geometric-topological model of a fortification position, which is considered as a network of nodes and connections within a specific terrain. To form the optimal configuration of the position, geographic information system data on terrain, hydrological conditions, existing infrastructure, and restricted areas are used. The modeling algorithm includes the construction of a topological scheme of the position, parameterization of the geometric characteristics of its elements, verification of compliance with regulatory and technological constraints, and evaluation of operational indicators such as the length of movement routes, network capacity, and volumes of earthworks. The practical significance of the study lies in the possibility of reducing the time required for preparing design solutions, decreasing excessive earthworks, and optimizing movement logistics within the fortification position. The proposed approach improves the efficiency of planning fortification facilities, ensures better adaptation to specific terrain conditions, and reduces material and energy costs during construction and operation. The obtained results can be applied in the design of fortification systems, planning of defensive positions, and development of information systems for supporting engineering decision-making in the field of construction.

Keywords: geometric modeling; fortifications; spatial structure; planning organization; geographic information systems; information modeling of buildings; energy efficiency