

DOI: 10.32347/2786-7269.2026.16.255-268

УДК 624.042.8

к.т.н., доцент **Банах А.В.**,
av_banakh@znu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-0517-2157,
Гребенюк І.В.,
saliongsx@yahoo.com, ORCID: 0000-0003-4721-2505,
Гребенюк О.В.,
gsxgev@meta.ua, ORCID: 0000-0002-0123-6803,
к.арх., доцент **Сафонова О.Ю.**
oksanason@gmail.com, ORCID 0000-0003-3910-2402
Запорізький національний університет

ОСОБЛИВОСТІ ФУНДАМЕНТНИХ КОНСТРУКЦІЙ ШКІЛЬНИХ БУДІВЕЛЬ У СКЛАДНИХ ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНИХ УМОВАХ

Досліджуються закономірності формування архітектурно-конструктивних рішень шкільних будівель у районах із просідаючими ґрунтами, поширеними на значній частині України. Проблема забезпечення надійності та безпеки закладів середньої освіти є особливо актуальною в умовах повоєнної відбудови, коли відновлення шкільної мережі є важливою складовою відродження соціальної інфраструктури громад. Метою дослідження є аналіз та узагальнення українського досвіду проектування шкільних будівель у складних інженерно-геологічних умовах, визначення ефективних конструктивних схем фундаментів та перспективних напрямків їх удосконалення в умовах просадних ґрунтів. У дослідженні обґрунтовано актуальність будівництва закладів середньої освіти у складних інженерно-геологічних умовах, визначено принципи просторово-об'ємної організації шкільних будівель, проаналізовано досвід формування архітектурно-конструктивних рішень, адаптованих до нестабільного ґрунтового середовища. Визначено перспективні напрямки розвитку конструктивних систем фундаментів – геотехнічно адаптивні, інтелектуально керовані та модульно-збірні.

Ключові слова: просідаючі ґрунти; шкільні будівлі; системи фундаментів; геотехнічно адаптивне проектування; геотехнічна інженерна практика; сталий розвиток

Постановка проблеми. Більшість аварій в експлуатації будівель і споруд виникають внаслідок недоліків у проектуванні фундаментів в складних інженерно-геологічних умовах, конструктивні рішення яких значною мірою залежать від міцності та деформативності ґрунтів [1]. Більша частина території

України має складні для будівництва умови, в тому числі за рахунок геологічних особливостей. Наявність великої кількості територій зі складною геологічною будовою зумовлює необхідність розробки інженерних та проєктних рішень фундаментів, адаптованих до таких будівельних умов. Розробка геотехнічно адаптивних шкільних будівель повністю відповідає досягненню ключових Цілей сталого розвитку (ЦСР), визначених Організацією Об'єднаних Націй, а саме: забезпечення доступу до освіти незалежно від геологічних чи кліматичних умов (Ціль 4); впровадження інноваційних систем фундаментів, модульних будівельних рішень та цифрового моделювання взаємодії земляного полотна, фундаменту та конструкції; зменшення споживання матеріалів та енергії за рахунок використання адаптивних конструкцій та методів локального покращення ґрунту (Ціль 9); розвиток сталої освітньої інфраструктури, здатної функціонувати на просідаючих лесових ґрунтах (Ціль 11); застосування архітектурних та конструктивних рішень, що мінімізують вплив будівельної діяльності на навколишнє середовище; пом'якшення процесів ерозії та стабілізація мікроклімату місцевості за допомогою інженерних заходів (Ціль 13); збереження природного рельєфу під час забудови, мінімізація втручання в геологічну структуру (Ціль 15) [2].

Еволюція проєктування конструктивних систем шкільних будівель в умовах просідаючих ґрунтів в Україні відбувалася послідовно – від емпіричних та жорстких рішень (1930-1970 рр.), через етап систематизації та впровадження комбінованих схем (1980-2000 рр.), до сучасних геотехнічно адаптивних, цифрово забезпечених та інтелектуально керованих підходів, що склалися після 2010 року з впровадженням ДБН В.2.1-10:2009 «Основи та фундаменти конструкцій. Основні положення проєктування» та ДБН В.2.1-10:2018 «Основи та фундаменти будівель та споруд. Основні положення». Дослідники приділяють особливу увагу вдосконаленню пальових, пальово-плитних та комбінованих фундаментних систем, а також застосуванню геотехнічно-адаптивних рішень, що забезпечують стійкість конструкцій у змінних геологічних умовах. Водночас, питання проєктування сучасних фундаментних систем для середніх навчальних закладів, що дозволяють адаптувати будівлі до геологічного середовища, потребує подальшого наукового дослідження. Актуальність теми дослідження відповідає сучасним тенденціям інтеграції сталого розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За радянський період Україна накопичила значний досвід проєктування будівель та споруд у складних інженерно-геологічних умовах, у тому числі на просідаючих ґрунтах. Були розроблені типові проєкти шкільних будівель, що враховували просадочні властивості лесових ґрунтів [4, 5]. У 1990–2000-х роках комбіновані

конструктивні рішення фундаментів стали широко використовуватися в проєктуванні та будівництві українських шкіл, а після 2010 року відбувся поступовий перехід від жорстких до адаптивних фундаментних систем, здатних компенсувати деформації ґрунтового масиву [4, 6]. Сьогодні проєктування закладів загальної середньої освіти в складних інженерно-геологічних умовах здійснюється відповідно до ДБН В.1.1-45:2017 «Будівлі та споруди в складних інженерно-геологічних умовах. Загальні положення»; ДБН В.2.2-3:2018 «Навчальні заклади»; та ДБН В.1.1-24:2009 «Захист від небезпечних геологічних процесів. Основні положення проєктування», а також останніх наукових розробок у галузі геотехнічного моделювання та формування адаптивних фундаментних систем [3, 7, 8]. Більшість досліджень з проєктування фундаментів та ґрунтових масивів в складних інженерно-геологічних умовах містять науково обґрунтовані рекомендації для будівель та споруд різних типів. У численних публікаціях проаналізовані характеристики системи «ґрунтовий масив – фундамент – конструкція» в умовах просідаючих, зсувонебезпечних та неоднорідних ґрунтів, а також розроблені ефективні методи моделювання та підвищення стійкості фундаментів.

Мета досліджень. Метою цієї публікації є дослідження фундаментних систем шкільних будівель для складних інженерно-геологічних умов, а також визначення сучасних тенденцій проєктування, перспектив розвитку та раціонального вибору конструктивних систем фундаментів будівель закладів середньої освіти.

Виклад основного матеріалу. У сучасному контексті сталого розвитку територіальних громад та функціонування закладів середньої освіти як соціально-культурних центрів особливої актуальності набувають вимоги щодо забезпечення надійності, довговічності та безпеки конструкцій шкільних будівель. В умовах просідаючих ґрунтів, що характеризуються нестабільністю фізико-механічних властивостей, особливо у вологому стані, постійний моніторинг стану ґрунтового масиву стає необхідним для своєчасного виявлення деформацій. Це завдання може бути вирішене за допомогою використання інтелектуально керованих фундаментних систем, що включають сенсорні технології нового покоління – датчики вологості, температури, тиску та деформацій, інтегровані або в конструкцію фундаменту, або в шар ґрунту [9].

Отримана таким чином інформація обробляється за допомогою алгоритмів штучного інтелекту, що дозволяє швидко виявляти зміни вологості та температури в ґрунтовому масиві; ідентифікувати початкові локальні деформації у фундаменті або ростверку; прогнозувати напрямок і швидкість розвитку деформацій просідання шляхом аналізу змін напружено-

деформованого стану фундаментних конструкцій [10]. Такий підхід дозволяє передбачити потенційні деформації та вжити стабілізаційних заходів для конструктивних систем шкільних будівель – наприклад, стабілізацію ґрунту шляхом ін'єкцій, регулювання дренажу або зменшення навантажень на окремі ділянки.

У випадках, коли шкільні будівлі розташовані в районах із сезонним коливанням рівня ґрунтових вод або техногенними джерелами вологи, використання інтелектуально керованих фундаментних систем дозволяє виявляти та локалізувати проблеми на ранній стадії. Таким чином, архітектурно-конструктивна система шкільної будівлі функціонує як активно керована, здатна самостійно аналізувати свій стан та запобігати руйнівним процесам, тим самим забезпечуючи підвищення надійності будівель та споруд в умовах просідаючих ґрунтів [11].

Перспективним напрямком розвитку фундаментних систем шкільних будівель є геотехнічна адаптивність, яка базується на конструктивних прийомах, що дозволяють фундаментам адаптуватися до умов ґрунтової основи та враховувати деформації ґрунту без втрати несучої здатності [12]. Концепція геотехнічної адаптивності спирається на принцип структурної взаємодії в системі «ґрунтовий масив – фундамент – конструкція», де ґрунтова основа вважається динамічним елементом конструктивної системи [13]. Проектування геотехнічно адаптивних фундаментних систем базується на методах конструктивної відповідності, які включають введення елементів, здатних до незначних деформацій без руйнування (шари піску, гравію, армовані шари); сегментацію фундаментної системи (поділ будівлі на незалежні блоки з окремими фундаментами та деформаційними швами, що компенсують різницю в осіданнях); використання комбінованих схем (поєднання стрічкових, плитних та пальових елементів для перерозподілу навантаження залежно від ґрунтових умов); армування або стабілізацію земляного полотна за допомогою геосинтетичних матеріалів, ін'єкцій розчину, мікропаль або цементациї просідаючих шарів [14].

Плітно-пальові системи є одними з найефективніших сучасних типів фундаментів, що поєднують жорстку монолітну плиту з групами паль різної довжини. Плита виступає в ролі загального елемента розподілу навантаження, тоді як палі передають навантаження на глибші, більш стійкі шари ґрунту. Це забезпечує рівномірну деформаційну поведінку та компенсує локальне просідання [15]. Ще одним перспективним рішенням є використання армованих геотекстильних подушок, які утворюють своєрідну «гнучку платформу» під фундаментом. Застосування геотекстилю або геосіток зміцнює поверхневий шар ґрунтової основи, збільшує її несучу здатність та зменшує концентрацію

напружень у слабких зонах. Такі системи не тільки стабілізують ґрунтову основу, але й покращують дренаж та зменшують ризик зволоження просідаючих шарів. Для поглинання та компенсації деформацій під фундаментом використовуються еластичні або композитні демпфуючі шари, такі як полімерні, піщано-гравійні або комбіновані. Вони забезпечують часткову амортизацію динамічних та теплових впливів, створюючи буфер між конструкцією та ґрунтовим масивом, тим самим зменшуючи ризик утворення тріщин у надземній частині будівлі [16].

Окрему групу складають блочно-секційні фундаменти, де кожна об'ємна частина будівлі має свою власну опорну систему. Такі рішення дозволяють функціонально розділити будівлю на автономні частини (навчальний, спортивний, адміністративний блоки), розділені деформаційними швами, що компенсують різницю в осіданнях. Така схема забезпечує геотехнічну адаптивність шкільного комплексу та дозволяє проектувати будівлі навіть у районах з різними інженерно-геологічними умовами в межах одного будівельного майданчика [17, 18].

Одним з найперспективніших напрямків удосконалення конструктивних рішень фундаментів шкільних будівель є використання мікропальових та буроін'єкційних систем, які поєднують переваги пальових фундаментів та технологій покращення ґрунту. Мікропалі – це буронабивні або буроін'єкційні палі малого діаметра (зазвичай 80-300 мм), які працюють переважно на терті та досягають високої несучої здатності завдяки анкерному ефекту цементно-піщаного розчину, що ін'єктується під тиском. Буроін'єкційні палі створюються шляхом ін'єктування розчину під тиском у пробурену свердловину, що ущільнює навколишній ґрунт та формує міцне ґрунтоцементне ядро. Такі конструктивні системи можна будувати без значних розкопок або заміни ґрунту, мінімізуючи порушення природного земляного полотна та зберігаючи його структуру [19].

В умовах просідаючих ґрунтів використання мікропальових систем у фундаментних конструкціях сприяє передачі навантажень на глибші, стабільніші шари ґрунту, які не схильні до просідання та мають стабільні фізико-механічні властивості; зменшенню тиску на верхні слабкі шари завдяки рівномірному розподілу навантаження між кількома палями, що працюють разом з ростверком або плитним фундаментом; створенню армуючого ефекту в зоні фундаменту, оскільки палі діють як вертикальні елементи жорсткості, що стабілізують ґрунтову масу та запобігають розвитку локальних деформацій; забезпеченню локального зміцнення або відновлення несучої здатності фундаменту під час експлуатації шляхом додавання додаткових паль або повторного ін'єктування цементного розчину в проблемні ділянки [15].

Під час встановлення мікропальових фундаментів використовуються сталеві або композитні труби малого діаметра, які ін'єктуються цементно-піщаним розчином під тиском 0,5-1,0 МПа. Для покращення адгезії між розчином та навколишнім ґрунтом додають полімерні або мінеральні добавки для підвищення водонепроникності та міцності. Сучасні системи використовують самоін'єкційні палі, що спрощує встановлення та забезпечує рівномірне ущільнення ґрунту [15]. Важливою технологічною перевагою цих систем є їхня можливість встановлення під існуючими будівлями без використання важкої техніки [19]. Це дозволяє використовувати мікропалі під час реконструкції або розширення шкільних будівель, коли повна заміна фундаменту неможлива. Технологія буронабивних паль є екологічно чистою, оскільки мінімізує утворення відходів, вимагає мало води та не створює ні значного шуму, ні вібрації – вирішальних факторів під час будівництва середніх навчальних закладів. Фундаменти на мікропалях також можуть бути інтегровані з інтелектуальними системами моніторингу, що є перспективним підходом до розвитку інтелектуально керованих шкільних будівель в умовах просідаючих ґрунтів [11].

Використання геосинтетичних матеріалів у подушках ґрунтової основи забезпечує рівномірний розподіл навантаження, зменшення ґрунтових напружень та запобігання локальним деформаціям. Геотекстиль, георешітка та армуючі шари підвищують стійкість фундаменту та створюють умови для довгострокової та безпечної експлуатації будівлі. Застосування геосинтетичних шарів є важливим аспектом геотехнічно адаптивного будівництва, оскільки такі матеріали забезпечують фундаментній системі гнучкість та енергопоглинальну здатність, що дозволяє їй ефективно реагувати на нерівномірні осідання в умовах просідаючих ґрунтів [20].

Дослідження українських та зарубіжних дослідників підтверджують, що використання геосинтетичних матеріалів може збільшити несучу здатність фундаменту на 20–40%, зменшити осідання на 25–35% та продовжити термін служби фундаментів у 1,5-2 рази [16, 20]. Для малоповерхових шкільних будівель у сільській та приміській місцевості, де просідаючі ґрунти найбільш поширені, використання геосинтетичних матеріалів у подушках ґрунтового масиву забезпечує стійкість та рівномірність осідання фундаменту навіть за умов коливань вологості ґрунту. Це також дозволяє зменшити товщину ґрунтової подушки, тим самим зменшуючи обсяг земляних робіт та витрату матеріалів; сприяє швидкому монтажу та зниженню трудомісткості порівняно з традиційними бетонними підготовками; допомагає підтримувати природний гідрологічний режим ділянки, запобігаючи утворенню локальних зон надмірного зволоження через проникну структуру ґрунтів основи. Такі системи

особливо ефективні для модульних, збірних та блокових шкіл, де необхідно забезпечити стабільний фундамент без виконання складних або трудомістких фундаментних робіт.

Сучасні тенденції геотехнічного проектування спрямовані на інтеграцію геосинтетичних матеріалів з системами цифрового моніторингу та сенсорними технологіями наступного покоління. У міжнародній практиці вже впроваджуються так звані розумні геотекстилі – матеріали з вбудованими в їх структуру волоконно-оптичними датчиками, здатні контролювати деформації, а також зміни вологості та температури в межах фундаментної зони [21]. Це дозволяє перейти від пасивного до активного моніторингу умов земляного полотна, поєднуючи геотехнічну адаптивність з інтелектуальним управлінням фундаментною конструкцією.

Завдяки впровадженню геотехнічно адаптивних фундаментних систем в умовах просідаючих ґрунтів забезпечуються наступні переваги: зменшення нерівномірних осідань, які є основною причиною появи тріщин у стінах, перекриттях та інших несучих елементах будівель; підвищення довговічності та експлуатаційної надійності конструкцій завдяки зниженню внутрішніх напружень та рівномірному перерозподілу навантаження в системі «ґрунтова основа – фундамент»; спрощення реконструкції, модернізації або розширення будівлі завдяки автономності секцій та незалежності їх фундаментних систем; можливість локального підсилення або заміни окремих елементів фундаменту без переривання роботи всієї конструктивної системи [14].

Поєднання геотехнічно адаптивних та інтелектуально керованих фундаментних систем утворює інтегровану архітектурно-конструктивну модель, в якій фундамент виступає активним елементом, що забезпечує стійкість будівлі. Такий підхід відповідає принципам сталого будівництва, зменшує техногенне навантаження на природне середовище та забезпечує довгострокову довговічність шкільних будівель [11].

Модульно-збірні фундаменти вирізняються структурною автономією їх елементів, між якими передбачені технологічні або деформаційні шви для забезпечення геотехнічної адаптивності та рівномірних осідань на просідаючих та неоднорідних ґрунтах [22]. Основу таких систем складають залізобетонні, сталеві або комбіновані модулі, які можна збирати в різних конфігураціях залежно від типу будівлі та характеристик навантаження. Поширеними рішеннями є збірні плитні конструкції, блокові фундаменти на ущільнених ґрунтових основах, а також плитно-гвинтові схеми, що поєднують палі, опорні плити та монтажні рами [23].

Для шкільних будівель ця технологія пропонує низку переваг, зокрема скорочення часу будівництва фундаменту та витрат матеріалів; можливість

швидкої реконфігурації або демонтажу конструкції відповідно до принципів гнучкості та мобільності в сучасній архітектурі; мінімальний вплив на природне середовище, оскільки не потрібна масштабна заміна ґрунту; адаптивність до неоднорідних ґрунтових умов, де кожен модуль спирається на локально армовану ділянку земляного полотна.

Модульно-збірні фундаменти особливо ефективні для шкіл з об'ємно-просторовими блоками. Їх використання забезпечує рівномірні осідання, незалежну експлуатацію блоків та зменшує ризик розтріскування. Сучасна практика також передбачає інтеграцію модульно-збірних фундаментних систем з технологіями цифрового моніторингу, що дозволяє спостерігати за структурними вузлами, осіданнями та впливом вібрації в режимі реального часу [24]. Такі рішення утворюють нове покоління інтелектуально керованих фундаментних систем, які поєднують переваги швидкого складання, адаптивності до ґрунтових умов та високої експлуатаційної надійності [25]. Використання модульно-збірних фундаментів у шкільному будівництві повністю відповідає принципам сталого розвитку, оскільки сприяє раціональному використанню ресурсів, зменшенню вуглецевого сліду та потенціалу для повторного використання конструктивних елементів. Ці системи відкривають перспективи для створення швидкозведених, мобільних та трансформованих шкільних будівель, що відповідають сучасним потребам територіальних громад та викликам післявоєнної відбудови.

Комплексна інтеграція інтелектуально керованих, геотехнічно адаптивних та модульно-збірних фундаментних систем формує нову концепцію сталого шкільного будівництва, орієнтовану на безпеку, надійність та технологічну ефективність закладів загальної середньої освіти. Інтелектуальні системи забезпечують моніторинг та прогнозування роботи фундаменту в режимі реального часу; геотехнічно адаптивні рішення забезпечують здатність конструкцій до саморегуляції під впливом деформацій ґрунту; модульно-збірні системи гарантують ефективне встановлення, мобільність та можливість трансформації будівлі відповідно до потреб громади. Взаємодія цих трьох напрямків створює архітектурно-конструктивну модель нового покоління, де фундамент виступає активним елементом стійкості, який забезпечує довговічність, енергоефективність та екологічну стійкість шкільних будівель.

Висновки та рекомендації подальшого дослідження. Дослідження показало, що в умовах просідаючих ґрунтів найбільш доцільним підходом до проєктування є формування шкільних будівель з об'ємно-просторових блоків. Цей типологічний та конструктивний метод забезпечує узгодженість функціонально-планувальних та конструктивних рішень, дозволяє реалізувати системи сегментації фундаментів та деформаційних швів, а також сприяє

локалізації диференційних осідань, тим самим покращуючи ремонтпридатність та загальну стійкість будівлі. Встановлено, що найефективнішим та універсальним типом фундаменту для шкільних будівель, побудованих на просідаючих ґрунтах, є плитно-пальова або комбінована фундаментна система, доповнена демпфуючими шарами та геосинтетично-армованими подушками, що підвищують опір деформаціям та здатність до перерозподілу навантаження. Для об'ємно-просторових блоків зменшеної маси доцільно використовувати мілкозакладені стрічкові або плитні фундаменти з попередньою інженерною підготовкою ґрунтової основи. Встановлено, що надійність шкільних будівель в умовах просідаючих ґрунтів значною мірою забезпечується системою водозахисних заходів ґрунтового масиву, що включає поверхневий та кільцевий дренаж, мощення, гідроізоляційні бар'єри та моніторинг інженерних мереж, систематичне застосування яких значно знижує ризик вторинного просідання. Визначено, що використання технологій цифрового моделювання (BIM/GIS та 3D-чисельне моделювання) у поєднанні з геотехнічним моніторингом (датчики вологості, температури, порового тиску, деформації та нахилу) перетворює фундамент з пасивної опори на активний елемент контролю стану ґрунтової основи, забезпечуючи раннє виявлення та стримування деформацій. Доведено, що використання інноваційних матеріалів та технологій для покращення ґрунту, таких як мікроцементи, полімерні ін'єкційні суміші, наномодифіковані бетони, геосинтетичні матеріали та «розумний» геотекстиль, підвищує тріщиностійкість, водонепроникність та довговічність фундаментних систем, одночасно зменшуючи матеріаломісткість та мінімізуючи негативний вплив на навколишнє середовище. Обґрунтовано, що мікропальові та буроін'єкційні системи є високоефективними як для нового будівництва, так і для зміцнення фундаментів існуючих шкільних будівель, оскільки їх застосування не вимагає тривалих вологих процесів та мінімізує втручання в природне середовище. Встановлено, що перспективним напрямком розвитку конструктивних рішень для фундаментів шкільних будівель є впровадження модульно-збірних фундаментних систем, які поєднують переваги промислового виробництва з адаптивністю до конкретних інженерно-геологічних умов. Методологія проектування шкільних будівель в умовах просідаючих ґрунтів повинна базуватися на систематичному врахуванні функціонально-планувальних вимог до закладів середньої освіти, характеристик сучасних типів фундаментів та геотехнічних параметрів ділянки. Подальші дослідження повинні бути зосереджені на калібруванні цифрових двійників на основі даних польового моніторингу, стандартизації інтелектуальних геосинтетичних матеріалів для навчальних закладів, типізації модульно-збірних фундаментних систем та вдосконаленні методів оцінки

життєвого циклу (LCA/LCCA) в складних інженерно-геологічних умовах.

Бібліографія

1. Зоценко М.Л., Коваленко В.І., Яковлев А.В. Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи і фундаменти. Полтава: Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, 2003. 560 с.
2. Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015. United Nations. New York, 2015. Електронний ресурс: <https://www.refworld.org/legal/resolution/unga/2015/en/111816>.
3. ДБН В.1.1-45:2017. Будівлі і споруди в складних інженерно-геологічних умовах. Загальні положення. К., Мінрегіон України, 2017. 29 с.
4. Єжов В.І. Архитектура общественных зданий и комплексов. К., Вістка, 2006. 380 с.
5. Козорез Б.И, Ковальский Л.Н. Архитектура учебных зданий. К., Будівельник, 1980. 142 с.
6. Свитко В.А., Капак Н.Н. Здания сельских школ и дошкольных учреждений. К., Урожай, 1988. 192с.
7. ДБН В.2.2-3:2018. Будинки і споруди. Заклади освіти. К., Мінрегіон України, 2018. 57 с.
8. ДБН В.1.1-25-2009. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Інженерний захист територій та споруд від підтоплення та затоплення. К., Мінрегіонбуд України, 2009. 52 с.
9. Wang L., Qiao X., Li M., Zhang Y. Application and Development of Intelligent Systems in Coastal Soft Soil Foundation Projects. *Procedia Computer Science*. Vol. 243. 2024. P. 577-584. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.09.070>.
10. Pan P., Sun S.-H., Feng J.-X., Wen J.-T., Lin J.-R., Wang H.-S. Intelligent Monitoring System for Deep Foundation Pit Based on Digital Twin. *Buildings*. 2025. Vol. 15(3). P. 366. <https://doi.org/10.3390/buildings15030366>.
11. Банах В.А., Банах М.С. Применение современных BIM и геоинформационных технологий в городском планировании и содержании городской застройки. Містобудування та територіальне планування: наук.-техн. збірник. К., КНУБА, 2016. Вип. 62. Ч.1. С. 36-41.
12. Банах В.А., Фостащенко О.М. Особливості урахування просторової роботи конструкцій будівель і ґрунтових основ у складних інженерно-геологічних умовах. Містобудування та територіальне планування: наук.-техн. збірник. К., КНУБА, 2013. Вип. 50. С. 39-45.
13. Банах В.А., Банах А.В. Моделирование взаимодействия системы «здание (сооружение) – основание» при передаче динамических воздействий через грунтовые основания. Містобудування та територіальне планування: наук.-техн. збірник. К., КНУБА, 2012. Вип. 44. С. 26-36.
14. Банах В.А. Статико-динамические расчетные модели зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических условиях: Монография. Запоріжжя: ЗДІА, 2012. – 334 с.
15. Evans J., Ruffing D., Elton D. Fundamentals of Ground Improvement Engineering. London: CRC Press, 2021. 430 p. Kumar S., Singh S.K. Subgrade Soil Stabilization Using Geosynthetics: A Critical Review. *Materials Today: Proceedings*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.266>.
16. Слепцов О.С. Формирование объемно-планировочной структуры школьных зданий в сложных инженерно-геологических условиях (просадочные грунты и подрабатываемые территории): Дис. ... канд. архитектуры: 18.00.02. К., КиївЗНДІЕП, 1986.

230 с.

17. ДБН В.2.1-10:2018. Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення. К., Мінрегіон України, 2018. 36 с.
18. Sree Naga Chaitanya J., Chandramouli K., Divya K., Siva Sai Kalyan G. A Review on Micro Piles. *International Research Journal of Modernization in Engineering, Technology and Science*. 2025. 5(2):694–697. <https://doi.org/10.56726/IRJMETS33506>.
19. Rad H.T., Jalali F.M., Gheibi M., Khaksar R.Y., Annuk A., Moezzi R. Enhancing Load-Bearing Capacity of Weak Soils Using Geosynthetics: A Finite Element Analysis. *Mining*, 2024. 4:777–805. MDPI. <https://doi.org/10.3390/mining4040044>.
20. Abedi M., Fangueiro R., Correia A.G., Shayanfar J. Smart Geosynthetics and Prospects for Civil Infrastructure Monitoring: A Comprehensive and Critical Review. *Sustainability*, 2023. 15(9):9258. MDPI. <https://doi.org/10.3390/su15129258>.
21. American Institute of Architects (AIA). *Design for Modular Construction: An Introduction for Architects*. Washington DC, 2019. 41 p.
22. Gunawardena T., Mendis P. Prefabricated Building Systems – Design and Construction. *Encyclopedia*. 2022. 2:70–95. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia2010006>.
23. Parracho D.F.R., Nour El-Din M., Esmaeili I., Freitas S.S., Rodrigues L., Poças Martins J., Corvacho H., Delgado J.M.P.Q., Guimarães A.S. Modular Construction in the Digital Age: A Systematic Review on Smart and Sustainable Innovations. *Buildings*, 2025. 15(5):765. <https://doi.org/10.3390/buildings15050765>.
24. Gao M.Y., Han C., Yang Y., Tiong R.L.K. Integration of BIM and RFID-Sensing for Automated Prefabrication and Progress Monitoring in Modular Construction. In: *Proceedings of the 41st International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC), Singapore, 2024. Pp. 1033–1039. URL: https://www.iaarc.org/publications/fulltext/133_ISARC_2024_Paper_113.pdf.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor **Andrii Banakh**,
Senior Lecturer **Ihor Hrebenuk**, Senior Lecturer **Olena Hrebenuk**,
Candidate of Architecture, Associate Professor **Oksana Sazonova**,
Zaporizhzhia National University

FEATURES OF FOUNDATION STRUCTURES OF SCHOOL BUILDINGS IN COMPLEX ENGINEERING AND GEOLOGICAL CONDITIONS

The article studies the patterns of the formation of architectural and structural solutions for school buildings in areas with collapsible soils, common in a significant part of Ukraine. The problem of ensuring the reliability and safety of secondary education institutions is particularly relevant in the conditions of post-war reconstruction, when the restoration of the school network is an important component of the revival of the social infrastructure of communities. The purpose of the study is to analyze and generalize the Ukrainian experience in designing school buildings in complex engineering and geological conditions, to determine effective structural foundation systems and promising directions for their improvement under conditions

of collapsible soils. The study substantiates the relevance of the construction of secondary education institutions in challenging geotechnical conditions, determines the principles of spatial and volumetric organization of school buildings, and analyses the experience of forming architectural and structural solutions adapted to the unstable soil environment. Prospective directions for the development of structural foundation systems have been identified – geotechnically adaptive, intelligently controlled and modular-prefabricated. The results of the study show that the combination of architectural and planning adaptation, geotechnically adaptive solutions and intelligent subgrade monitoring systems increases the stability of structures, reduces the risk of deformations and extends their service life, ensuring the creation of a safe and durable educational environment.

Keywords: collapsible soils; school buildings; structural foundation systems; geotechnically adaptive design; geotechnical engineering practice; sustainable and resilient development

REFERENCES

1. Zotsenko M.L., Kovalenko V.I., Yakovliev A.V. *Inzhenerna heolohiia. Mekhanika gruntiv, osnovy i fundamenti*. Poltava : Poltavskiyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet imeni Yurii Kondratiuka, 2003. 560 s. {in Ukrainian}.
2. *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015. United Nations. New York, 2015. <https://www.refworld.org/legal/resolution/unga/2015/en/111816>. {in English}.
3. DBN V.1.1-45:2017. *Budivli i sporudy v skladnykh inzhenerno-heolohichnykh umovakh. Zahalni polozhennia*. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2017. 29 s. {in Ukrainian}.
4. Iezhov V.I. *Arkhytektura obshchestvennykh zdanyi y kompleksov*. Kyiv : Vistka, 2006. 380 s. {in Russian}.
5. Kozorez B.Y., Kovalskiy L.N. *Arkhytektura uchebnykh zdanyi*. Kyiv : Budivelnyk, 1980. 142 s. {in Russian}.
6. Svytko V.A., Karak N.N. *Zdanyia selskykh shkol y doshkolnykh uchrezhdeniy*. Kyiv : Urozhai, 1988. 192s. {in Russian}.
7. DBN V.2.2-3:2018. *Budynky i sporudy. Zaklady osvity*. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2018. 57 s. {in Ukrainian}.
8. DBN V.1.1-25-2009. *Zakhyst vid nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv, shkidlyvykh ekspluatatsiynykh vplyviv, vid pozhezhi. Inzhenernyi zakhyst terytorii ta sporud vid pidtoplennia ta zatoplennia*. Kyiv : Minrehionbud Ukrainy, 2009. 52 s. {in Ukrainian}.
9. Wang L., Qiao X., Li M., Zhang Y. *Application and Development of*

Intelligent Systems in Coastal Soft Soil Foundation Projects. *Procedia Computer Science*. Vol. 243. 2024. P. 577-584. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.09.070>. {in English}.

10. Pan P., Sun S.-H., Feng J.-X., Wen J.-T., Lin J.-R., Wang H.-S. Intelligent Monitoring System for Deep Foundation Pit Based on Digital Twin. *Buildings*. 2025. Vol. 15(3). P. 366. <https://doi.org/10.3390/buildings15030366>. {in English}.

11. Banakh V.A., Banakh M.S. Prymenenye sovremennykh BIM y heoynformatsyonnykh tekhnolohyi v horodskom planyrovanuy y sodержanyu horodskoi zastroiky. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*. Kyiv : KNUBA, 2016. Vyp. 62. Ch.1. S. 36-41. {in Russian}.

12. Banakh V.A., Fostashchenko O.M. Osoblyvosti urakhuvannia prostоровoi roboty konstruktsii budivel i gruntovykh osnov u skladnykh inzhenerno-heolohichnykh umovakh. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*. Kyiv : KNUBA, 2013. Vyp. 50. S. 39-45. {in Ukrainian}.

13. Banakh V.A., Banakh A.V. Modelyrovanye vzaymodeistviya systemy «zdaneye (sooruzheneye) – osnovanye» pry peredache dynamycheskykh vozdeistviy cherez hruntovye osnovanyia. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*. Kyiv : KNUBA, 2012. Vyp. 44. S. 26-36. {in Russian}.

14. Banakh V.A. Statyko-dynamycheskye raschetnyye modely zdanyi y sooruzheniy v slozhnykh ynzhenerno-heolohycheskykh uslovyiakh : Monohrafiya. Zaporizhzhia: ZDIA, 2012. – 334 s. {in Russian}.

15. Evans J., Ruffing D., Elton D. *Fundamentals of Ground Improvement Engineering*. London : CRC Press, 2021. 430 p. <https://doi.org/10.1201/9780367816995>. {in English}.

16. Kumar S., Singh S.K. Subgrade Soil Stabilization Using Geosynthetics: A Critical Review. *Materials Today: Proceedings*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.266>. {in English}.

17. Sleptsov O.S. Formyrovanye ob'yemno-planirovochnoi struktury shkolnykh zdanyi v slozhnykh ynzhenerno-heolohycheskykh uslovyiakh (prosadochnnye hruntы y podrabatyvaemye terrytoryy) : Dys. ... kand. arkhytektury: 18.00.02. Kyiv: KyivZNDIEP, 1986. 230 s. {in Russian}.

18. DBN V.2.1-10:2018. *Osnovy i fundamente budivel ta sporud. Osnovni polozhennia*. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2018. 36 s. {in Ukrainian}.

19. Sree Naga Chaitanya J., Chandramouli K., Divya K., Siva Sai Kalyan G. A Review on Micro Piles. *International Research Journal of Modernization in Engineering, Technology and Science*. 2025. 5(2):694–697. <https://doi.org/10.56726/IRJMETS33506>. {in English}.

20. Rad H.T., Jalali F.M., Gheibi M., Khaksar R.Y., Annuk A., Moezzi R. Enhancing Load-Bearing Capacity of Weak Soils Using Geosynthetics: A Finite

Element Analysis. Mining, 2024. 4:777–805. MDPI. <https://doi.org/10.3390/mining4040044>. {in English}.

21. Abedi M., Fangueiro R., Correia A.G., Shayanfar J. Smart Geosynthetics and Prospects for Civil Infrastructure Monitoring: A Comprehensive and Critical Review. Sustainability, 2023. 15(9):9258. MDPI. <https://doi.org/10.3390/su15129258>. {in English}.

22. American Institute of Architects (AIA). Design for Modular Construction: An Introduction for Architects. Washington DC, 2019. 41 p. {in English}.

23. Gunawardena T., Mendis P. Prefabricated Building Systems – Design and Construction. Encyclopedia. 2022. 2:70–95. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia2010006>. {in English}.

24. Parracho D.F.R., Nour El-Din M., Esmaili I., Freitas S.S., Rodrigues L., Poças Martins J., Corvacho H., Delgado J.M.P.Q., Guimarães A.S. Modular Construction in the Digital Age: A Systematic Review on Smart and Sustainable Innovations. Buildings, 2025. 15(5):765. <https://doi.org/10.3390/buildings15050765>. {in English}.

25. Gao M.Y., Han C., Yang Y., Tiong R.L.K. Integration of BIM and RFID-Sensing for Automated Prefabrication and Progress Monitoring in Modular Construction. Proceedings of the 41st International Symposium on Automation and Robotics in Construction. International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC), Singapore, 2024. Pp. 1033–1039. https://www.iaarc.org/publications/fulltext/133_ISARC_2024_Paper_113.pdf. {in English}.