

РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-4(38)-292-305

УДК 624.042.4:550.34

**Юрій Всеволодович Максим'юк¹, Олександр Володимирович Авдійчук²,
Дмитро Володимирович Лук'янчук³**

¹доктор технічних наук, професор кафедри будівельної механіки
Київський національний університет будівництва і архітектури (Київ, Україна)
E-mail: maksymiuk.iuv@knuba.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5814-6227>

²аспірант кафедри будівельної механіки
Київський національний університет будівництва і архітектури (Київ, Україна)
E-mail: avdiichuk_ov-2022@knuba.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1035-2084>

³аспірант кафедри будівельної механіки Київський національний університет будівництва і архітектури
E-mail: lukianchuk_dv-2022@knuba.edu.ua ORCID: та <https://orcid.org/0009-0003-1182-2472>

ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СЕЙСМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ СУЧАСНИХ КОНСТРУКЦІЙ

У контексті глобальної урбанізації та збільшення частоти сейсмічних подій забезпечення сейсмостійкості споруд стає одним із ключових викликів у сфері цивільного будівництва. Аналіз сучасних технічних рішень для підвищення сейсмічної стійкості споруд, з акцентом на інноваційні матеріали, конструктивні системи та технології сейсмоізоляції. Дослідження базується на порівняльному аналізі сучасних інженерних рішень, аналізі літературних джерел та прикладних прикладів з реального будівництва, з використанням систематичного підходу до оцінки їхньої ефективності. Представлено огляд новітніх матеріалів, таких як високоміцний бетон та еластомерні підкладки, конструктивних рішень, зокрема базової ізоляції та систем розсіювання енергії, а також технологій інтеграції сейсмоізоляції в архітектурний дизайн споруд. Аналіз демонструє, що використання цих рішень значно покращує здатність будівель витримувати сейсмічні навантаження. Запропоновано комплексний підхід до інтеграції інноваційних матеріалів та технологій у проектування та будівництво сейсмостійких споруд, що може слугувати основою для подальшого розвитку стандартів у цій сфері.

Ключові слова: сучасні конструкції; інженерні рішення; матеріали; сейсмостійкі технології; моделювання.
Табл.: 4. Бібл.: 18.

Актуальність теми дослідження. Забезпечення сейсмічної стійкості сучасних конструкцій є одним із найважливіших завдань сучасного будівництва. Землетруси залишаються одними з найбільш руйнівних природних явищ, які спричиняють значні людські жертви, економічні втрати та дезорганізацію суспільного життя. Особливо це стосується густонаселених районів і регіонів із розвиненою критичною інфраструктурою, де зростаюча урбанізація та збільшення кількості висотних будівель посилюють потенційні ризики, пов'язані із сейсмічною активністю. Це вимагає впровадження сучасних технічних рішень, які забезпечуватимуть ефективне проектування, будівництво та модернізацію споруд для збереження їхньої функціональності під час сейсмічних впливів та мінімізації руйнувань.

Світова сейсмічна активність, ускладнена непередбачуваністю інтенсивності та часу виникнення землетрусів, підкреслює необхідність застосування надсучасних інженерних практик. Аналіз досвіду катастрофічних подій, таких як землетрус у Тохоку (Японія, 2011 рік), землетруси в Туреччині та Сирії (2023 рік), демонструє масштабні наслідки неналежного сейсмічного проектування та наголошує на важливості використання інноваційних будівельних рішень, орієнтованих на стійкість до землетрусів. Ці події стимулювали розвиток матеріалознавства, інженерії та комп'ютерного моделювання, що створило нові можливості для підвищення сейсмічної стійкості споруд.

В Україні актуальність теми визначається тим, що частина її територій, зокрема Закарпаття, Одеська область, розташовані в сейсмічно активних зонах. Багато будівель у цих регіонах не відповідають сучасним сейсмічним нормам, що становить значну загрозу

для безпеки людей та функціонування інфраструктури. Завдання модернізації таких споруд стає надзвичайно актуальним і потребує інтеграції сучасних технологій, таких як сейсмоізолятори, системи демпфування та адаптивні фундаменти.

Розвиток матеріалів, таких як високоміцний бетон, композитні матеріали та сталі нових марок, дозволяє створювати конструкції, які є одночасно пластичними, міцними та легкими. Інтеграція динамічних гасителів коливань та систем розсіювання енергії забезпечує додатковий захист від руйнівної дії землетрусів. У поєднанні з комп'ютерним моделюванням ці технології дозволяють прогнозувати поведінку конструкцій і мінімізувати ризики. Сейсмостійке проектування відповідає глобальним ініціативам зі створення сталого міського середовища, забезпечуючи безперервність функціонування критичної інфраструктури під час надзвичайних ситуацій. Таким чином, впровадження інноваційних рішень у проектування та модернізацію споруд є важливим чинником соціальної, економічної та екологічної стабільності.

Постановка проблеми. Землетруси становлять постійну й непередбачувану загрозу для безпеки людей, економічної стабільності та цілісності інфраструктури. Незважаючи на значний розвиток будівельних технологій і сучасних інженерних підходів, забезпечення стійкості конструкцій до сейсмічних впливів залишається складним завданням, особливо в регіонах із високою сейсмічною активністю. Трагедії, спричинені великими землетрусами, демонструють серйозність цієї проблеми, адже вони часто супроводжуються численними людськими жертвами, значними матеріальними втратами та довготривалими перебоями у функціонуванні критично важливих систем. Такі події підкреслюють нагальну потребу в розробленні надійних технічних рішень, спрямованих на ефективне зменшення сейсмічних ризиків [1].

Однією з головних перешкод є складність характеристик сейсмічних сил, які мають динамічний, різноспрямований характер і варіюються за інтенсивністю. Сучасні будівлі в міському середовищі, зокрема багатопверхові споруди зі складною геометрією та новітніми матеріалами, хоч і відповідають високим архітектурним і функціональним стандартам, часто характеризуються уразливістю до сейсмічних впливів. Реакція конструкцій на землетруси значною мірою залежить від взаємодії сейсмічних хвиль зі структурними елементами та від нелінійної поведінки матеріалів під дією динамічних навантажень. Це зумовлює необхідність використання передових методів моделювання і точних інженерних підходів для забезпечення довготривалої стійкості.

Додатковою проблемою є геологічні та геотехнічні умови, властиві різним будівельним майданчикам. Зміни у складі ґрунту, стратиграфії та рівнях ґрунтових вод можуть суттєво впливати на передачу й посилення сейсмічних хвиль. Ігнорування цих факторів під час проектування може призвести до руйнування фундаментів, нерівномірного осідання або резонансу конструкцій, що збільшує ризик їхнього обвалу. Сучасна інженерна практика повинна враховувати ці аспекти шляхом детального аналізу кожного об'єкта та впровадження інноваційних фундаментних систем.

Особливу загрозу становить застаріла інфраструктура, яка зберігається в багатьох сейсмічно активних регіонах. Значна кількість будівель і критично важливих об'єктів була зведена до введення сучасних норм сейсмічного проектування, що робить їх вразливими навіть до помірних землетрусів. Модернізація таких споруд стикається з численними викликами – від фінансових і технічних до логістичних. Це ускладнює адаптацію існуючої інфраструктури до сучасних стандартів сейсмостійкості. Для країн, таких як Україна, де частина території належить до зон підвищеної сейсмічної активності, ця проблема набуває особливого значення через наявність застарілих будівель і процесів активної урбанізації.

Водночас впровадження сучасних систем сейсмозахисту, таких як демпфери, ізолятори та адаптивні технології, залишається обмеженим через недостатність ресурсів, технічного досвіду та недоліки в нормативно-правовій базі. Попри підтверджену ефективність цих систем у зменшенні впливу землетрусів, їх використання залишається непослідовним у різних регіонах і масштабах проєктів. Це свідчить про потребу в інтеграції сучасних технологій у стандартизовану будівельну практику та забезпечення їхньої доступності як для нових проєктів, так і для програм модернізації.

Неадекватність чинних норм сейсмічного проєктування для врахування всього спектра потенційних сейсмічних сценаріїв є ще однією значною проблемою. Чинні стандарти часто базуються на спрощених моделях і припущеннях, які не враховують складність реальних землетрусів. Як наслідок, навіть конструкції, що відповідають сучасним нормам, можуть зазнати серйозних пошкоджень або обвалів під час сильних чи тривалих поштовхів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні наукові досягнення в галузі сейсмічної стійкості зосереджені на розробці інноваційних матеріалів, структурних систем та обчислювальних методів для підвищення стійкості сучасних конструкцій. М. Shahjalal, А. К. М. Yahia, А. S. М. Morshed та N. I. Tanha [3] у своїй роботі досліджують інновації та виклики в проєктуванні сейсмостійких будівель. Вони підкреслюють важливість використання новітніх матеріалів і технологій для створення споруд, здатних витримувати сейсмічні впливи у високоризикових регіонах.

А. А. Mohamud, F. E. Aitettaleb, S. Z. Elabidine та M. R. U. Isalm [4] акцентують увагу на інтеграції сучасних технологій, таких як демпфери та сейсмоізолятори, у будівництво. У дослідженні запропоновано інноваційні підходи до застосування цих технологій для підвищення стійкості як нових конструкцій, так і модернізованих об'єктів, особливо в сейсмічно активних регіонах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У галузі матеріалознавства такі науковці, як В. Глуховський, Ю. Немчинов, М. Мар'єнков, К. Бабік [5] та В. Ясній, В. Будз [6], провели дослідження вискоефективних матеріалів для сейсмостійких конструкцій. Їхні роботи висвітлюють важливість сучасних композитів, таких як полімери, армовані вуглецевим волокном (CFRP), які демонструють високе співвідношення міцності до ваги і відмінні властивості розсіювання енергії. Такі матеріали дедалі частіше застосовуються для модернізації існуючих конструкцій та будівництва легких і стійких будівель. Наукові здобутки цих дослідників підкреслюють необхідність інтеграції новітніх матеріалів у практику проєктування для ефективного зменшення сейсмічних ризиків.

Структурні інновації також перебувають у центрі уваги останніх досліджень. Вагомий внесок у вивчення поведінки сталевих і композитних конструкцій під дією сейсмічних навантажень зробили Г. Гетун, В. Колякова, А. Соломін, І. Безклубенко [7]. Їхні дослідження пластичності та здатності поглинання енергії сталевих елементів конструкцій стали основою для розроблення стратегій проєктування будівель і мостів.

У сфері технологій сейсмічної ізоляції та демпфування О. Гаврилюк, Д. Нечипоренко, В. Жук [8] розглянули застосування фундаментних ізоляторів та додаткових систем демпфування. Їхні дослідження еластомерних і ковзних підшипників демонструють ефективність цих рішень в ізоляції будівель від коливань ґрунту, що значно зменшує передачу сейсмічних сил на надбудови. Науковці також вивчають гібридні системи ізоляції, які поєднують кілька механізмів демпфування для досягнення оптимальної роботи в різних сейсмічних умовах.

Методи комп'ютерного моделювання значно вдосконалено завдяки внеску Д. Мальчицького та В. Фурмана [9]. Їхні дослідження аналізують сучасні алгоритми моделювання сейсмічних реакцій в умовах невизначеності. Ці моделі інтегрують геологічні дані,

структурні властивості та поведінку матеріалів для забезпечення точних прогнозів сейсмічних характеристик. Результати таких досліджень важливі для розроблення імовірнісних підходів до проектування, які враховують невизначеність сейсмічної небезпеки та властивостей матеріалів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на значний прогрес у сейсмостійкому будівництві, деякі аспекти забезпечення сейсмічної стійкості сучасних споруд залишаються недостатньо дослідженими. До них належать оптимізація гібридних систем сейсмічної ізоляції для висотних будівель у регіонах зі складною структурою сейсмічних хвиль і розробка економічно ефективних методів модернізації старіючих конструкцій в умовах обмежених ресурсів. Натепер нами здійснюється внесок через розробку обчислювальних моделей для моделювання роботи гібридної ізоляції під різноспрямованими сейсмічними навантаженнями, а також через створення інноваційних матеріалів для доступного зміцнення конструкцій. Ці зусилля спрямовані на подолання недоліків поточних практик, пропонуючи практичні та масштабовані підходи до підвищення стійкості сучасних та існуючих конструкцій.

Метою дослідження є аналіз сучасних інноваційних технічних рішень для підвищення сейсмостійкості будівель з акцентом на інтеграцію цих рішень у проектування та модернізацію конструкцій, враховуючи специфіку сейсмічно активних регіонів України. Особлива увага приділяється адаптації високоміцних матеріалів, впровадженню систем демпфування, сейсмічної ізоляції та використанню комп'ютерного моделювання для передбачення поведінки конструкцій під час землетрусів.

Виклад основного матеріалу. Сейсмічна стійкість конструкцій є важливим елементом сучасного будівництва, особливо в районах, схильних до землетрусів. Забезпечення цілісності конструкції під час сейсмічних навантажень вимагає комплексного вивчення поведінки різних структурних систем, причин пошкоджень під час сейсмічних явищ та принципів, що покладені в основу проектування сейсмостійких будівель. Конструкції можна умовно поділити на жорсткі, гнучкі та комбіновані системи, кожна з яких по-різному реагує на сейсмічні коливання [10]. До жорстких конструкцій, які зазвичай мають високу жорсткість, належать будівлі із залізобетону або цегляної кладки. Такі конструкції ефективно опираються деформації, але їхня жорсткість робить їх вразливими до крихких пошкоджень, особливо в слабких місцях, таких як стики або з'єднання. При дії горизонтальних сейсмічних сил жорсткі конструкції зазнають значних напружень на зсув, що призводить до утворення тріщин або руйнування, якщо межа міцності матеріалу на зсув перевищується. Вертикальні сили можуть ще більше посилити ці напруження, зокрема в будівлях з великими сконцентрованими навантаженнями.

Натомість гнучкі конструкції спроектовані так, що можуть витримувати більші деформації, не отримуючи при цьому суттєвих ушкоджень. Будівлі зі сталевим каркасом і легкі дерев'яні конструкції є типовими прикладами. Такі конструкції за рахунок контрольованої деформації поглинають сейсмічну енергію, зменшуючи ймовірність їх катастрофічного пошкодження. Але їхня гнучкість може призвести до значних зсувів під час сильних землетрусів, що може спричинити вторинні небезпеки, такі як обвал неконструктивних елементів або контакт з сусідніми будівлями. Важливою проблемою гнучких систем є явище резонансу, яке виникає, коли власна частота конструкції збігається з переважаючою частотою сейсмічних хвиль. Резонанс збільшує динамічну реакцію, викликаючи екстремальні деформації, які можуть перевищувати проектні межі конструкції.

Комбіновані конструкції поєднують жорсткість певних елементів з гнучкістю інших, що дозволяє збалансувати жорсткість і пластичність. Наприклад, залізобетонні ядра в поєднанні зі сталевими рамами або системами кріплення часто використовуються у висотних будівлях. Такі системи спрямовані на оптимізацію розсіювання енергії та обмеження

деформацій, покращуючи загальні сейсмічні характеристики. Комбіновані системи потребують уважного проектування для забезпечення сумісності між жорсткими та гнучкими компонентами, оскільки відмінності в їхніх динамічних реакціях можуть спричинити внутрішні напруження або локальні руйнування.

Руйнування конструкцій під час сейсмічних подій є багатофакторними, часто пов'язаними із взаємодією різних чинників [11]. Значну роль відіграють динамічні навантаження, зокрема, горизонтальні, вертикальні та резонансні сили. Горизонтальні навантаження виникають внаслідок бокового руху ґрунту, який створює інерційні сили, пропорційні масі споруди. Такі сили можуть викликати напруження згину, зсуву і скручування, які перевищують здатність матеріалу витримувати навантаження. Вертикальні сейсмічні сили, зазвичай менші за величиною, можуть мати виражений вплив на конструкції з нерівномірним розподілом маси або недостатньою вертикальною здатністю витримувати навантаження. Нелінійність деформації матеріалу також є важливим фактором, що впливає на сейсмічну реакцію. Багато будівельних матеріалів, таких як бетон і сталь, проявляють нелінійну поведінку під впливом високих навантажень, зокрема, піддаються деформації, розтріскуванню або пластичній деформації. Нелінійні реакції можуть призвести до розсіювання енергії і перерозподілу напружень, але за відсутності належного контролю можуть також прискорити прогресуюче руйнування.

Класифікація конструкцій за сейсмічною стійкістю та їхню реакцію на сейсмічні навантаження представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Класифікація будівельних конструкцій за сейсмічною стійкістю [10-11]

Тип	Приклади	Характеристики сейсмічної реакції	Проблеми
Жорсткі конструкції	Залізобетон, цегляна кладка	Висока жорсткість, обмежена деформація; стійкість до зсувних та згинальних сил	Схильність до крихкого руйнування; концентрація напружень у слабких місцях
Гнучкі конструкції	Сталеві рами, дерев'яні будівлі	Низька жорсткість, висока деформація; ефективне розсіювання енергії	Великі переміщення; резонансні ефекти; потенціал для неструктурних пошкоджень
Комбіновані конструкції	Сталезалізобетонні ядра	Баланс між жорсткістю та гнучкістю; оптимізоване розсіювання енергії	Сумісність динамічних реакцій; локалізовані напруження на межі між жорсткими та гнучкими елементами

Вивчення причин руйнувань під час сейсмічних подій має важливе значення для вдосконалення проектування та будівництва сейсмостійких споруд. Резонансні ефекти, зокрема, підкреслюють необхідність динамічного аналізу у процесі проектування. Це передбачає визначення власних частот конструкції та забезпечення їх значної відмінності від переважаючих частот очікуваних сейсмічних хвиль. Для оцінки динамічної поведінки конструкцій і виявлення потенційних режимів руйнування застосовуються сучасні обчислювальні інструменти та експериментальні випробування.

Моделювання сейсмічного впливу на будівельні конструкції є одним із ключових компонентів сейсмостійкого будівництва, оскільки це дає змогу інженерам передбачати та зменшувати вплив сейсмічних сил на споруди. Досягнення в обчислювальних методах і методах збору даних суттєво підвищили точність і надійність таких моделей. Серед найпоширеніших методів чисельного аналізу в цій галузі є метод скінченних елементів (МСЕ), який забезпечує потужну основу для моделювання складних взаємодій між сейсмічними силами та структурними системами.

Метод скінченних елементів полягає у поділі конструкції на дискретні елементи, кожен із яких описується математичними рівняннями, що відображають його поведінку під дією різних навантажень. Отримані рівняння розв'язуються ітераційно, що дозволяє визначити реакцію всієї конструкції на сейсмічні впливи. Цей метод дає змогу проводити детальний аналіз напружень, деформацій і переміщень, що є важливим для виявлення

слабких місць і оптимізації проєкту. МСЕ застосовується як для лінійного, так і для нелінійного аналізу, враховуючи зміни властивостей матеріалів під впливом екстремальних навантажень, таких як плинність або розтріскування в залізобетоні чи пластичні деформації у сталі.

Сейсмічні карти та інженерно-геологічні дослідження в поєднанні з кількісними методами відіграють важливу роль у моделюванні сейсмічних ефектів. Сейсмічні карти надають дані про сейсмічність регіону, зокрема про місцезнаходження і магнітуду історичних землетрусів, а також про інтенсивність і частоту підземних рухів. Ці карти ґрунтуються на геологічних і сейсмологічних дослідженнях, що містять інформацію про лінії розломів, тектонічну активність та стан ґрунтів.

Використовуючи сейсмічні карти, інженери можуть оцінити очікувані сейсмічні сили, з якими споруда може зіткнутися протягом свого терміну експлуатації. Це є основою для вибору параметрів проєктування. Карти сейсмічного районування поділяють територію на зони залежно від рівня сейсмічної небезпеки, встановлюючи будівельні норми та методи проєктування, які забезпечують належний рівень сейсмостійкості споруд відповідно до їхнього розташування.

Інженерно-геологічні дослідження є важливим інструментом для підвищення точності моделювання сейсмічних ефектів, оскільки вони забезпечують глибоке розуміння специфічних умов ґрунту та підземних шарів на конкретній ділянці. Під час таких досліджень аналізуються параметри, як-от тип ґрунту, стратиграфія, рівень ґрунтових вод і динамічні характеристики, включно зі швидкістю зсувних хвиль та коефіцієнтами демпфування. Поведінка ґрунту під впливом сейсмічного навантаження, яка може включати явища розрідження, посилення або ослаблення сейсмічних хвиль, є одним із ключових чинників, що враховується у структурному аналізі. Наприклад, м'які ґрунти можуть підсилювати інтенсивність руху ґрунту, збільшуючи навантаження на конструктивні елементи споруд, тоді як водонасичені ґрунти здатні втрачати несучу здатність через розрідження під час сильних струсів. Інтеграція цих даних у чисельні моделі дозволяє враховувати реальні умови об'єкта та знижувати ризик недооцінки можливих загроз.

Поєднання кількісних методів з використанням сейсмічних карт і даних інженерно-геологічних досліджень створює основу для комплексного моделювання. Такі моделі враховують багатовимірність сейсмічних сил, включно з горизонтальними та вертикальними компонентами, а також взаємодію споруд із навколишніми ґрунтами. Сучасні обчислювальні технології дозволяють відтворювати складні сценарії, такі як нелінійна динамічна реакція конструкцій на рух ґрунту або зміни в сейсмічних характеристиках через взаємодію між ґрунтом і спорудою. Використання імовірнісного аналізу сейсмічної небезпеки (PSHA) забезпечує врахування невизначеностей, пов'язаних із сейсмічним моделюванням, включно з варіаціями інтенсивності, частоти та тривалості підземних рухів.

Сейсмічні карти також є ключовим компонентом під час оцінювання ризиків. Вони надають інформацію про регіональну сейсмічність, охоплюючи дані про історичні землетруси, магнітуду, частоту та інтенсивність підземних рухів. Карти базуються на геологічних і сейсмологічних дослідженнях, які враховують лінії розломів, тектонічну активність і фізико-механічні властивості ґрунтів. Завдяки цьому інженери отримують можливість оцінювати очікувані сейсмічні навантаження на споруди протягом їхнього життєвого циклу та вибирати оптимальні проєктні параметри. Регіональне сейсмічне зонування дозволяє класифікувати території за рівнем небезпеки та розробляти будівельні норми, адаптовані до умов конкретного місця.

У табл. 2 наведено ключові компоненти та підходи, які використовуються для сучасного сейсмічного моделювання.

Розвиток комп'ютерного моделювання та технологій збору даних постійно вдосконалює точність сейсмічного аналізу. Інтеграція сейсмічних карт високої роздільної здатності, новітніх геотехнічних досліджень та сучасних чисельних методів дозволяє інженерам проектувати конструкції, стійкі до сейсмічних впливів. Це забезпечує надійність і безпеку споруд у сейсмонебезпечних регіонах. Поєднання передових підходів уможливує точний прогноз сейсмічної реакції будівель, що дає змогу впроваджувати превентивні заходи для підвищення їхньої стійкості та мінімізації ризику катастрофічних руйнувань під час землетрусів.

Таблиця 2 – Сучасні компоненти сейсмічного моделювання [12-13]

Компонент	Характеристика	Основні сфери застосування
Метод скінченних елементів	Чисельний метод поділу конструкцій на дискретні елементи для моделювання поведінки під дією сейсмічних навантажень	Детальний аналіз напружено-деформованого стану, виявлення слабких місць, оптимізація проектування конструкцій
Сейсмічні карти	Надають дані про сейсмічність, лінії розломів та характеристики руху ґрунту	Оцінка розрахункових сейсмічних навантажень, сейсмічне районування, відповідність будівельним нормам
Інженерно-геологічні дослідження	Оцінка специфічних умов ґрунту та підземних вод на ділянці	Оцінка поведінки ґрунту під дією сейсмічних навантажень, врахування взаємодії ґрунту з конструкцією

Сейсмічна стійкість є основною вимогою до споруд у регіонах з високим рівнем сейсмічної небезпеки. Це вимагає інтеграції прогресивних технічних рішень, що охоплюють вибір матеріалів, конструктивне проектування та впровадження інноваційних технологій. Вибір матеріалів і конструктивних елементів є ключовим чинником у протистоянні сейсмічним навантаженням [14]. Високоякісний бетон та арматура активно застосовуються для підвищення міцності та пластичності структурних компонентів. Залізобетон здатний витримувати як стискаючі, так і розтягувальні навантаження, а правильне розташування арматури забезпечує ефективне розсіювання енергії та запобігає крихким руйнуванням.

Використання сталевих каркасів у будівництві забезпечує високу гнучкість і пластичність конструкцій. Це дозволяє спорудам деформуватися без руйнування під впливом динамічних навантажень, характерних для сейсмічних подій. Здатність сталі поглинати й розсіювати енергію робить її незамінним матеріалом для будівництва висотних будівель та інженерних споруд.

Останніми роками значний інтерес викликають легкі композитні матеріали завдяки їхньому високому співвідношенню міцності до ваги та довговічності. Полімери, армовані вуглецевим волокном (CFRP), та полімери, армовані скловолокном (GFRP), широко використовуються для модернізації існуючих конструкцій або як основні компоненти у новому будівництві. Невелика вага цих матеріалів знижує інерційні сили під час землетрусу, а їхня висока пластичність забезпечує стійкість до деформацій [15].

Інтеграція демпферів і систем сейсмічної ізоляції значно покращує сейсмічні характеристики будівель завдяки поєднанню інновацій у матеріалах із передовими інженерними рішеннями. Демпфери, які поглинають і розсіюють сейсмічну енергію, мають кілька типів, кожен із яких вирізняється своїми особливостями. В'язкі демпфери функціонують на основі камер, заповнених рідиною, які перетворюють кінетичну енергію в теплову, ефективно зменшуючи амплітуду коливань. Фрикційні демпфери використовують поверхні ковзання, що розсіюють енергію за рахунок сили тертя, забезпечуючи при цьому простоту конструкції та довговічність. Металеві демпфери, виготовлені здебільшого зі сталі, працюють шляхом пластичної деформації під навантаженням, розсіюючи енергію через зміну форми матеріалу. Ці пристрої зазвичай встановлюють у каркасах конструкцій або в критично важливих з'єднаннях для контролю зсувів і зменшення пошкоджень.

Сейсмічні ізолятори забезпечують додатковий рівень захисту, ізолюючи конструкцію від коливань ґрунту завдяки гнучким шарам або опорам, розташованим між фундаментом і надбудовою. Найпоширеніші ізолятори включають еластомерні підшипники, підшипники ковзання та підшипники зі свинцевим сердечником, кожен із яких пристосований до специфічних структурних вимог. Їх встановлення потребує ретельного проєктування для забезпечення стабільності та відповідності проєкту будівлі. Сучасні конструкції нерідко використовують гібридні системи, які комбінують демпфери та ізолятори для досягнення оптимальної ефективності в різних сейсмічних сценаріях.

Інноваційні технології лежать в основі створення нових рішень для підвищення сейсмічної стійкості. Наприклад, динамічні гасителі коливань налаштовані на певні частоти сейсмічних хвиль, що дає змогу ефективно нейтралізувати резонансні ефекти. Такі системи особливо корисні для високих або тонких конструкцій, таких як вежі чи мости, де резонанс може стати значною загрозою. Ще одним важливим досягненням є розробка систем «активного фундаменту», які застосовують датчики та приводи для моніторингу та регулювання реакції споруди в реальному часі. Такі системи можуть адаптуватися до різних рівнів сейсмічної інтенсивності, активно перерозподіляючи сили або змінюючи жорсткість конструкції, забезпечуючи її стабільність навіть за непередбачуваних умов.

Адаптивні конструкції, що поєднують «розумні» матеріали та автоматизовані системи управління, уособлюють майбутнє сейсмічної інженерії. Ці конструкції здатні змінювати свої властивості, такі як жорсткість чи демпфування, у відповідь на зовнішні подразники, оптимізуючи свою поведінку під час сейсмічних подій. Таким чином, поєднання традиційних і передових технологій у галузі сейсмічної інженерії забезпечує високу ефективність захисту будівель у сейсмонезбезпечних регіонах. У табл. 3 наведені технічні рішення, що обговорювалися, та їхні ключові характеристики.

Таблиця 3 – Технологічні рішення для забезпечення сейсмостійкості будівель [14-15]

Технічні рішення	Характеристика	Головні переваги
Високоякісний бетон і сталь	Використання залізобетону та сталі для забезпечення міцності та пластичності	Розсіювання енергії, стійкість до стискаючих і розтягуючих навантажень
Легкі композитні матеріали	Використання вуглепластику та склопластику для модернізації та первинного будівництва	Зменшені інерційні сили, високе співвідношення міцності до ваги
В'язкі демпфери	Наповнені рідиною пристрої, що перетворюють кінетичну енергію в теплову	Зменшення амплітуди вібрації, ефектне розсіювання енергії
Фрикційні демпфери	Поверхні ковзання, що розсіюють енергію за рахунок тертя	Простота, довговічність і легкість в обслуговуванні
Сейсмічні ізолятори	Гнучкі шари, що відокремлюють конструкції від коливань ґрунту	Зменшення передачі коливань ґрунту, захист критично важливих компонентів
Динамічні гасителі коливань	Налаштовані системи, що протидіють певним сейсмічним частотам	Пом'якшення резонансних ефектів, стабільність для високих і тонких конструкцій
Активні фундаменти	Системи з датчиками і приводами для регулювання реакції конструкції в реальному часі	Адаптація в реальному часі, підвищена стійкість в умовах змінної сейсмічної інтенсивності
Адаптивні конструкції	Розумні матеріали та системи, які змінюють структурні властивості під час сейсмічних подій	Оптимізація жорсткості та демпфування, футуристична стійкість

Реалізація технічних рішень у сфері сейсмостійкого будівництва вимагає комплексного підходу, що поєднує знання матеріалознавства, будівельної інженерії та сучасних технологій. Досягнення в комп'ютерному моделюванні та системах моніторингу в режимі реального

часу значно підвищують ефективність таких рішень. Інтегруючи високоефективні матеріали, складні системи демпфування та ізоляції, а також інноваційні адаптивні технології, інженери постійно вдосконалюють сейсмічну стійкість сучасних конструкцій. Застосування цих заходів є критично важливим для забезпечення безпеки населення та зменшення економічних втрат у сейсмонебезпечних регіонах, що підкреслює значення постійних досліджень і розробок у сфері сейсмостійкості [16].

Розробка сейсмостійких конструкцій є багатопрофільним процесом, який об'єднує геологічні дослідження, інженерні методи та інноваційні технології для створення споруд, здатних протистояти сейсмічним впливам. Цей процес починається з ретельного аналізу вихідних даних, які забезпечують основу для ухвалення обґрунтованих рішень на кожному етапі проектування. Важливими складовими є геологія та сейсмічність. Геологічні дослідження дозволяють визначити фізичні та механічні властивості ґрунту, включаючи стратиграфію, рівень ґрунтових вод і схильність до розрідження, що впливає на статичну взаємодію споруди з основою під час землетрусу. Сейсмічні дослідження включають аналіз регіональної сейсмічної активності, історичних даних про землетруси, близькості ліній розломів і очікуваних параметрів руху ґрунту, таких як прискорення, швидкість і зміщення. Поєднання цих даних дозволяє інженерам створювати моделі сейсмічної небезпеки для конкретної ділянки, що визначає вибір проектних параметрів.

На наступному етапі здійснюється вибір концептуального проекту та попередні розрахунки. Визначаються основні характеристики планування та конструктивної системи, акцентуючи увагу на простоті й симетрії структурного плану для мінімізації торсійних ефектів під час землетрусів. Попередні розрахунки спрямовані на оцінку ключових параметрів, таких як власні частоти конструкції, сили зсуву основи та розподіл напружень за умов сейсмічних навантажень. Ці розрахунки стають базою для уточнення проекту на наступних етапах, забезпечуючи відповідність нормам сейсмічного проектування. Концептуальний проект передбачає також вибір матеріалів і методів будівництва, які збалансують міцність, пластичність і технологічність. У пріоритеті використовуються такі матеріали, як високоміцний бетон, конструкційна сталь та композити, що забезпечують високі характеристики в умовах динамічних навантажень.

Врахування сейсмічних навантажень є ключовим аспектом сейсмостійкого проектування. Інженери повинні враховувати різні сценарії землетрусів, включаючи помірні, сильні та рідкісні, щоб забезпечити безпеку й функціональність споруд за будь-яких умов. Моделювання навантажень передбачає імітацію впливу руху ґрунту на конструкцію, враховуючи горизонтальні й вертикальні компоненти, а також потенційні резонансні ефекти. Для створення детальних моделей, які враховують нелінійну поведінку матеріалів і структурних елементів під впливом сейсмічного навантаження, використовуються сучасні обчислювальні інструменти, такі як метод скінченних елементів. Стандартизовані методи перевірки стійкості, викладені в нормативних кодексах сейсмічного проектування, надають рекомендації для оцінки ключових критеріїв ефективності, включаючи міцність, жорсткість і пластичність. Ці норми також визначають такі фактори, як коефіцієнти модифікації реакції та категорії важливості, що дозволяє адаптувати проектні вимоги до конкретного призначення будівлі та чисельності її мешканців. Зазвичай оцінка стійкості включає використання динамічного аналізу, наприклад спектрального аналізу або методів часової динаміки, які допомагають прогнозувати поведінку конструкції за реальних сейсмічних умов [17].

Адаптація існуючих будівель до сучасних сейсмічних стандартів є ще одним важливим напрямом сейсмостійкого будівництва, особливо в регіонах із застарілою інфраструктурою [18]. Методи реконструкції та зміцнення спрямовані на поліпшення сейсмічних

характеристик старих будівель, які спочатку не були розроблені для витримування землетрусів або які з часом зазнали погіршення технічного стану. Поширені методи зміцнення включають додавання залізобетонної або сталеві арматури для підвищення бічного опору, використання полімерів, армованих волокном, для модернізації колон і балок, а також встановлення систем ізоляції фундаменту, що дозволяє зменшити вплив коливань ґрунту на будівлю. Такі підходи не лише покращують міцність, а й забезпечують пластичність конструкцій, знижуючи ймовірність обвалення під час землетрусів. Практичне впровадження цих методів має широке застосування у світовій практиці. Зокрема, у таких країнах, як Японія, США та Італія, значні ресурси було інвестовано в модернізацію історичної та критично важливої інфраструктури для підвищення її сейсмічної стійкості.

В Україні реалізуються заходи з адаптації існуючих будівель до сучасних сейсмічних вимог, зокрема в південно-західних регіонах, де ризики є підвищеними через близькість до зони Карпатського розлому. Помітні проекти включають зміцнення лікарень, шкіл і житлових будинків у таких містах, як Чернівці та Одеса. Ці ініціативи часто здійснюються у співпраці між місцевими органами влади, науковими установами та міжнародними організаціями, що підкреслює важливість скоординованого підходу до мінімізації сейсмічних ризиків.

Досвід, отриманий у межах цих проектів, вказує на необхідність запровадження надійних технічних стандартів, забезпечення достатнього фінансування та проведення інформаційних кампаній серед громадськості. Такий комплексний підхід є ключовим для успішної реалізації програм модернізації, спрямованих на довгострокове зниження загроз від сейсмічних впливів.

У табл. 4 подано узагальнені ключові аспекти сейсмостійкого проектування та заходів з адаптації.

Таблиця 4 – Головні аспекти сейсмостійкого проектування і заходів з адаптації будівель [16-18]

Аспект	Характеристика	Головні завдання
Аналіз вихідних даних	Геологічні та сейсмічні дослідження для визначення параметрів небезпеки на конкретній ділянці	Точна оцінка небезпеки, проектування фундаменту та оптимізація конструкції
Вибір конструкції та попередні розрахунки	Розробка планування, конструктивної системи та вибір матеріалів	Простота, симетрія та попередня оцінка сейсмічних характеристик
Моделювання навантаження та перевірка стійкості	Моделювання сейсмічних впливів за допомогою обчислювальних інструментів та дотримання норм проектування	Забезпечення міцності, жорсткості та пластичності; прогнозування реальних характеристик
Адаптація існуючих будівель	Реконструкція та зміцнення старих будівель відповідно до сучасних сейсмічних вимог	Підвищення безпеки, продовження терміну експлуатації та зменшення сейсмічних ризиків

Конструювання сейсмостійких споруд вимагає комплексного підходу, що включає ретельний аналіз даних, застосування сучасних методів моделювання та впровадження інноваційних рішень для укріплення конструкцій. Урахування сейсмічних ризиків на всіх етапах проектування та адаптація існуючої інфраструктури до сучасних стандартів забезпечують підвищення безпеки населення та мінімізацію наслідків землетрусів. Інженери, працюючи над зниженням вразливості до сейсмічних впливів, роблять вагомий внесок у забезпечення стійкості споруд. Отже, впровадження цих принципів, підтримане постійними дослідженнями та міжнародною співпрацею, сприяє подальшому розвитку сфери сейсмостійкого будівництва. Такий підхід дозволяє ефективно реагувати на виклики, пов'язані з сейсмічною небезпекою, та підвищувати рівень захищеності в регіонах, що перебувають у зоні підвищеного ризику.

Висновки. Результати дослідження технічних аспектів сейсмостійкості сучасних конструкцій свідчать про необхідність комплексного підходу, що включає використання інноваційних матеріалів, передових інженерних методів і надійних підходів до проектування. Сучасні матеріали, такі як пластичний бетон і сталь, демонструють високу ефективність у поглинанні та розсіюванні сейсмічної енергії, що мінімізує можливість пошкодження конструкцій. Завдяки впровадженню передових методів моделювання, таких як аналіз методом скінченних елементів і сейсмічне моделювання, інженери отримують змогу прогнозувати поведінку споруд під дією навантажень, оптимізуючи проекти для забезпечення їхньої стійкості. Ці технології в поєднанні зі строгим дотриманням сейсмічних норм і стандартів створюють передумови для формування безпечної та довговічної інфраструктури.

Інтеграція інноваційних систем, таких як ізоляція фундаменту й пристрої для розсіювання енергії, є важливим чинником підвищення сейсмостійкості конструкцій. Системи ізоляції фундаменту дозволяють ефективно відокремити будівлю від ґрунтових коливань, істотно знижуючи передачу сейсмічної енергії на споруду. Демпфери, зокрема, забезпечують ефективне розсіювання енергії через перетворення кінетичної енергії в теплову, що значно зменшує вплив сейсмічних сил на конструкцію. Практика впровадження цих систем у сучасні проекти підтверджує їхню здатність суттєво підвищувати сейсмічну стійкість, що сприяє зниженню матеріальних втрат і забезпеченню безпеки.

Подальший розвиток технологій сейсмостійкості пов'язаний із впровадженням адаптивних конструкцій, здатних динамічно реагувати на сейсмічні явища. Такі конструкції, розроблені з урахуванням сучасних технологій і матеріалів, відкривають нові можливості для інженерного забезпечення безпеки в умовах підвищеного сейсмічного ризику.

Список використаних джерел

1. Allen, R. M. Global growth of earthquake early warning / R. M. Allen, M. Stogaitis // *Science*. – 2022. – Vol. 375(6582). – Pp. 717-718. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.abl5435>.
2. Shaffril, H. A. M. Speaking of the devil: a systematic literature review on community preparedness for earthquakes / H. A. M. Shaffril, A. A. Samah, S. Kamarudin // *Natural Hazards*. – 2021. – Vol. 108(3). – Pp. 2393-2419. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04867-7>.
3. Earthquake-Resistant Building Design: Innovations and Challenges / M. Shahjalal, A. K. M. Yahia, A. S. M. Morshed, N. I. Tanha // *Global Mainstream Journal of Innovation, Engineering & Emerging Technology*. – 2024. – Vol. 3(4). – Pp. 101-119. DOI: <https://doi.org/10.62304/jieet.v3i04.209>.
4. Integrating Modern Technologies for Earthquake-Resistant Buildings / A. A. Mohamud, F. E. Aitettaleb, S. Z. Elabidine, M. R. U. Islam // *European Journal of Theoretical and Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 2(6). – Pp. 403-412. DOI: [https://doi.org/10.59324/ejtas.2024.2\(6\).34](https://doi.org/10.59324/ejtas.2024.2(6).34).
5. Сейсмостійке будівництво в Україні: стан експериментально-теоретичних досліджень та розробка нормативної бази / В. Глуховський, Ю. Немчинов, М. Мар'єнков, К. Бабік // *Наука та будівництво*. – 2023. – Вип. 37(3). – С. 42-51. DOI: <https://doi.org/10.33644/313-6679-3-2023-5>.
6. Ясній, В. П. Пристрої та системи захисту будівель та споруд від дії циклічних навантажень: сучасний стан та перспективи / В. П. Ясній, В. І. Будз // *Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій*. – 2023. – Вип. 1(36). – С. 105-114. DOI: <https://doi.org/10.15421/4223109>.
7. Особливості проектування сталевих сейсмостійких конструкцій висотних будівель / Г. Гетун, В. Колякова, А. Соломін І. Безклубенко // *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. – 2022. – Вип. 11. – С. 18-31. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.11.2022.18-31>.
8. Гаврилюк, О. Напружено-деформований стан конструкцій будинку з врахуванням можливої локальної відмови елемента / О. Гаврилюк, Д. Нечипоренко, В. Жук // *Bases and Foundations*. – 2024. – Вип. 48. – С. 100-115. DOI: <https://doi.org/10.32347/0475-1132.48.2024.100-115>.
9. Малицький, Д. Комп'ютерне моделювання теплового режиму геологічного і геофізичного середовищ / Д. Малицький, В. Фурман // *Електроніка та інформаційні технології*. – 2023. – Вип. 15. – С. 48-58. DOI: <https://doi.org/10.30970/eli.15.5>.
10. Integrated rehabilitation of reinforced concrete buildings: Combining seismic retrofit by means of low-damage exoskeleton and energy refurbishment using multi-functional prefabricated facade / I. Sebastiani, S. D'Amore, R. Pinotti, S. Pampanin // *Journal of Building Engineering*. – 2024. – Vol. 95. – Article ID: 110368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.110368>.

11. Framework for seismic risk analysis of engineering structures considering the coupling damage from multienvironmental factors / J. L. Zhang, G. Li, D. H. Yu, Z. Q. Dong // *Journal of Structural Engineering*. – 2024. – Vol. 150(10). – Article ID: 04024147. DOI: <https://doi.org/10.1061/JSENDH.STENG-13340>.
12. Nonlinear modeling of the seismic response of masonry structures: critical review and open issues towards engineering practice / S. Cattari, B. Calderoni, I. Calì, G. Camata, S. de Miranda, G. Magenes A. Saetta // *Bulletin of Earthquake Engineering*. – 2022. – Vol. 20(4). – Pp. 1939-1997. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01263-1>.
13. Empirical seismic vulnerability assessment model of typical urban buildings / Si-Qi Li, Y. S. Chen, H. B. Liu, C. Del Gaudio // *Bulletin of Earthquake Engineering*. – 2023. – Vol. 21(4). – Pp. 2217-2257. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01585-8>.
14. Zakian, P. Seismic design optimization of engineering structures: a comprehensive review / P. Zakian, A. Kaveh // *Acta Mechanica*. – 2023. – Vol. 234(4). – Pp. 1305-1330. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00707-022-03470>.
15. Mirfarhadi, S. A. On optimal proportions of structural member cross-sections to achieve best seismic performance using value based seismic design approach / S. A. Mirfarhadi, H. E. Estekanchi, M. Sarcheshmehpour // *Engineering Structures*. – 2021. – Vol. 231. – Article ID: 111751. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111751>.
16. Sajan, K. C. Progress in sustainable structural engineering: a review / K. C. Sajan, D. Gautam // *Innovative Infrastructure Solutions*. – 2021. – Vol. 6(2). DOI: <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00419-3>.
17. Askar, R. Adaptability of buildings: a critical review on the concept evolution / R. Askar, L. Bragança, H. Gervásio // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11(10). – Article ID: 4483. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11104483>.
18. Seismic and energy integrated retrofitting of existing buildings with an innovative ICF-based system: design principles and case studies / V. Pertile, A. Stella, L. De Stefani, R. Scotta // *Sustainability*. – 2021. – Vol. 13(16). – Article ID: 9363. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13169363>.

References

1. Allen, R. M., & Stogaitis, M. (2022). Global growth of earthquake early warning. *Science*, 375(6582), 717–718. <https://doi.org/10.1126/science.abl5435>.
2. Shaffril, H. A. M., Samah, A. A., & Kamarudin, S. (2021). Speaking of the devil: A systematic literature review on community preparedness for earthquakes. *Natural Hazards*, 108(3), 2393–2419. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04867-7>.
3. Shahjalal, M., Yahia, A. K. M., Morshed, A. S. M., & Tanha, N. I. (2024). Earthquake-resistant building design: Innovations and challenges. *Global Mainstream Journal of Innovation, Engineering & Emerging Technology*, 3(4), 101–119. <https://doi.org/10.62304/jieet.v3i04.209>.
4. Mohamud, A. A., Aitettaleb, F. E., Elabidine, S. Z., & Islam, M. R. U. (2024). Integrating modern technologies for earthquake-resistant buildings. *European Journal of Theoretical and Applied Sciences*, 2(6), 403–412. [https://doi.org/10.59324/ejtas.2024.2\(6\).34](https://doi.org/10.59324/ejtas.2024.2(6).34).
5. Glukhovskiy, V., Nemchynov, Yu., Mariienkov, M., & Babik, K. (2023). Seismostiike budivnytstvo v Ukraini: Stan eksperymentalno-teoretychnykh doslidzhen ta rozrobka normatyvnoi bazy [Seismic-resistant construction in Ukraine: State of experimental-theoretical research and development of regulatory framework]. *Nauka ta Budivnytstvo – Science and Construction*, 37(3), 42–51. <https://doi.org/10.33644/313-6679-3-2023-5>.
6. Yasnii, V. P., & Budz, V. I. (2023). Prystroi ta systemy zakhystu budivel ta sporud vid dii tsyklichnykh navantazhen: Suchasnyi stan ta perspektyvy [Devices and systems for protecting buildings and structures from cyclic loads: Current state and prospects]. *Problemy Obchysluvalnoi Mekhaniky i Mitsnosti Konstruktsii – Problems of Computational Mechanics and Structural Strength*, 1(36), 105-114. <https://doi.org/10.15421/4223109>.
7. Hetun, H., Koliakova, V., Solomin, A., & Bezkyubenko, I. (2022). Osoblyvosti proiektuvannia stalevykh seismostiikykh konstruktsii vysotnykh budivel [Design features of steel earthquake-resistant structures of high-rise buildings]. *Budivelni Konstruktsii. Teoriia i Praktyka – Building Structures. Theory and Practice*, 11, 18–31. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.11.2022.18-31>.

8. Havryliuk, O., Nechyporenko, D., & Zhuk, V. (2024). Napruzhenno-deformovanyi stan konstruktsii budynku z vrakhuvanniam mozhlivoi lokalnoi vidmovy elementu [Stress-strain state of building structures considering possible local element failure]. *Bases and Foundations*, 48, 100–115. <https://doi.org/10.32347/0475-1132.48.2024.100-115>.
9. Malyskyi, D., & Furman, V. (2023). Kompiuterne modeliuвання teplovoho rezhymu heolohichnoho i heofizychnoho seredovysch [Computer modeling of the thermal regime of geological and geophysical environments]. *Elektronika ta Informatsiini Tekhnolohii – Electronics and Information Technologies*, 15, 48–58. <https://doi.org/10.30970/eli.15.5>.
10. Sebastiani, I., D'Amore, S., Pinotti, R., & Pampanin, S. (2024). Integrated rehabilitation of reinforced concrete buildings: Combining seismic retrofit by means of low-damage exoskeleton and energy refurbishment using multi-functional prefabricated facade. *Journal of Building Engineering*, 95, Article 110368. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110368>.
11. Zhang, J. L., Li, G., Yu, D. H., & Dong, Z. Q. (2024). Framework for seismic risk analysis of engineering structures considering the coupling damage from multi-environmental factors. *Journal of Structural Engineering*, 150(10), Article 04024147. <https://doi.org/10.1061/JSENDH.STENG-13340>.
12. Cattari, S., Calderoni, B., Calì, I., Camata, G., de Miranda, S., Magenes, G., & Saetta, A. (2022). Nonlinear modeling of the seismic response of masonry structures: Critical review and open issues towards engineering practice. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(4), 1939–1997. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01263-1>.
13. Li, S. Q., Chen, Y. S., Liu, H. B., & Del Gaudio, C. (2023). Empirical seismic vulnerability assessment model of typical urban buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21(4), 2217–2257. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01585-8>.
14. Zakian, P., & Kaveh, A. (2023). Seismic design optimization of engineering structures: A comprehensive review. *Acta Mechanica*, 234(4), 1305–1330. <https://doi.org/10.1007/s00707-022-03470>.
15. Mirfarhadi, S. A., Estekanchi, H. E., & Sarcheshmehpour, M. (2021). On optimal proportions of structural member cross-sections to achieve best seismic performance using value-based seismic design approach. *Engineering Structures*, 231, Article 111751. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111751>.
16. KC, S., & Gautam, D. (2021). Progress in sustainable structural engineering: A review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(2). <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00419-3>.
17. Askar, R., Bragança, L., & Gervásio, H. (2021). Adaptability of buildings: A critical review on the concept evolution. *Applied Sciences*, 11(10), Article 4483. <https://doi.org/10.3390/app11104483>.
18. Pertile, V., Stella, A., De Stefani, L., & Scotta, R. (2021). Seismic and energy integrated retrofitting of existing buildings with an innovative ICF-based system: Design principles and case studies. *Sustainability*, 13(16), Article 9363. <https://doi.org/10.3390/su13169363>.

Отримано 17.12.2024

UDC 624.042.4:550.34

Yurii Maksymiuk¹, Oleksandr Avdiichuk², Dmytro Lukianchuk³

¹Doctor of Science (Engineering), Associate Professor,
Professor at the KNUCA Department of Structural Mechanics, Faculty of Construction
Kyiv National University of Construction and Architecture (Kyiv, Ukraine)

Email: maksymiuk.iuv@knuba.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5814-6227>

²Postgraduate at the KNUCA Department of Structural Mechanics, Faculty of Construction
Kyiv National University of Construction and Architecture (Kyiv, Ukraine)

Email: avdiichuk_ov-2022@knuba.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0007-1035-2084>

³Postgraduate at the KNUCA Department of Structural Mechanics, Faculty of Construction
Kyiv National University of Construction and Architecture (Kyiv, Ukraine)

Email: lukianchuk_dv-2022@knuba.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0003-1182-2472>

TECHNICAL ASPECTS OF ENSURING SEISMIC STABILITY OF MODERN STRUCTURES

The article examines an important area of civil engineering that is becoming increasingly significant in the context of growing urbanization and the increasing frequency of seismic events worldwide. As populations concentrate in earthquake-prone regions, ensuring the structural integrity of buildings and infrastructure becomes a primary task for architects, engineers, and urban planners. The relevance of this topic is determined by the devastating impact of earthquakes on human life, economic stability, and environmental integrity, making the development of reliable methods and technologies to improve seismic resilience essential.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

The aim of the research is to explore and analyze advanced engineering solutions, in particular innovative materials, structural systems and seismic isolation technologies, to improve the seismic stability of modern structures while addressing practical implementation challenges.

The article presents a comprehensive analysis of current technical solutions used in the design and construction of earthquake-resistant structures. It discusses advancements in materials science, innovative architectural designs, and the integration of modern engineering technologies such as base isolation, energy dissipation systems, and reinforced concrete technologies. The role of computer programs and modeling in predicting seismic responses and optimizing structural performance under dynamic loads is also highlighted. The results show that the use of these modern methods significantly enhances the ability of structures to withstand seismic forces, thereby reducing the potential for catastrophic failure.

Thus, the study emphasizes the necessity for continuous innovation and adaptation in seismic design practices. The article underscores the need for a multidisciplinary approach that incorporates knowledge from geotechnical engineering, materials science, and architecture to create resilient urban environments. Furthermore, it advocates for updating building codes and regulations to reflect the latest research findings and technological advancements. The article confirms that, despite significant progress in ensuring the seismic stability of modern structures, ongoing research and collaborative efforts are crucial for addressing the evolving challenges posed by earthquakes.

Keywords: modern structures; engineering solutions; materials; earthquake-resistant technologies; modeling.

Table: 4. **References:** 18.