

Розділ 2

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ДІАГНОСТИКА РОБОТИ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ

УДК 624.15:699.841

СЕЙСМОЗАХИСТ МАЛОПОВЕРХОВИХ ВЕЛИКОПАНЕЛЬНИХ ТА МОДУЛЬНИХ КАРКАСНИХ БУДИНКІВ ВІД ПОТУЖНИХ ЗЕМЛЕТРУСІВ

М. Мар'єнков, д. т. н.

ORCID ID: 0000-0002-7246-845X

К. Бабік, к. т. н.

ORCID ID: 0000-0002-8763-510X

Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій, м. Київ

М. Лисиця, к. т. н.

ORCID ID: 0000-0001-6364-8937

Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова Національної академії наук України, м. Дніпро

Б. Хименко, аспірант

ORCID ID: 0000-0001-6364-8937

Національний університет біоресурсів та природокористування, м. Київ

<https://doi.org/10.31734/architecture2024.25.022>

Мар'єнков М., Бабік К., Лисиця М., Хименко Б. Сейсмозахист малоповерхових великопанельних та модульних каркасних будинків від потужних землетрусів

Упродовж 2022–2024 років в Україні внаслідок обстрілів і бомбардувань було зруйновано багато житлових будинків. Тому забезпечення житлом постраждалих мешканців – актуальна проблема. Зауважено, що вирішити проблему за короткий строк можливо завдяки будівництву збірних малоповерхових та модульних будинків. Забезпечення сейсмостійкості будівель під час будівництва у високосейсмічних зонах (за інтенсивності землетрусів вісім та дев'ять балів згідно зі шкалою сейсмічної інтенсивності) потребує влаштування сейсмічного захисту. Виявлено, що використання збірних великопанельних малоповерхових і каркасних модульних будинків дає змогу забезпечити будівництво сейсмостійких будинків у найкоротші строки. Виготовлення конструкцій панельних та модульних будинків у заводських умовах підвищує якість будівництва та сейсмостійкість конструкцій. Для зниження сейсмічних навантажень на малоповерхові будинки та вартості будівництва необхідні експериментально-теоретичні дослідження малоповерхових та модульних будинків із сейсмоізоляцією та демпферами. Розглянуто результати експериментальних та чисельних досліджень двоповерхового натурального зразка житлового великопанельного будинку із системою сейсмічного захисту у рівні фундаменту та за її відсутності. Досліджено модульний одноповерховий будинок із металевим каркасом, у якому зниження сейсмічних навантажень забезпечують динамічні параметри модулів та використання демпферів, встановлених у рівні покриття між двома модулями заводського виготовлення. Сейсмічність будівельного майданчика приймали вісім та дев'ять балів за шкалою сейсмічної інтенсивності відповідно до стандарту України ДСТУ Б В.1.1-28.

Ключові слова: сейсмоізоляція, високодемпфуючі гумометалеві сейсмоопори, демпфери, малоповерхові великопанельні та модульні каркасні будинки, частоти та декременти коливальних.

Marienkov M., Babik K., Lysytsia M., Khymenko B. Seismic protection of low-rise large-panel and modular frame buildings from powerful earthquakes

During the period of 2022–2024, many residential buildings were destroyed during shelling and bombing in Ukraine. Therefore, providing housing for the affected residents is an urgent problem. Solving this problem in a short period is possible due to the construction of prefabricated low-rise and modular houses. Ensuring the seismic resistance of buildings during construction in highly seismic zones (with the intensity of earthquakes of 8 and 9 points according to the seismic intensity scale) requires the installation of seismic protection. The use of prefabricated large-panel low-rise and frame modular buildings allows to ensure the construction of earthquake-resistant buildings in the shortest possible time. The production of

panel and modular building structures in factory conditions increases the quality of construction and the seismic resistance of the structures. To reduce the seismic loads on low-rise buildings and the cost of construction, experimental and theoretical studies of low-rise and modular buildings with seismic isolation and dampers are needed. The results of experimental and numerical studies of a two-story real-life sample of a large-panel residential building with a seismic protection system at the foundation level and without it are considered. Numerical studies of a modular one-story house with a metal frame were also carried out, in which the reduction of seismic loads is ensured by the dynamic parameters of the modules and the use of dampers installed at the level of the covering between two factory-made modules. The seismicity of the construction site during the research was taken as 8 and 9 points on the scale of seismic intensity in accordance with the standard of Ukraine DSTU B B.1.1-28.

Keywords: seismic isolation, highly damping rubber-metal seismic supports, dampers, low-rise large-panel and modular frame buildings, frequencies and decrements of vibrations.

Постановка проблеми. Відповідно до вимог ДБН В.1.1-12:2014 [1], під час проєктування житлових будинків необхідно враховувати сейсмічні навантаження інтенсивністю сім, вісім та дев'ять балів в Одеській області та в м. Одесі, на Закарпатті, Прикарпатті, у Криму та в інших сейсмоактивних зонах України. Згідно з міжнародним досвідом, найефективнішим способом зниження сейсмічних навантажень на конструкції надземної частини будівель і споруд є сейсмоізоляція [2–5]. Найбільше використовують системи сейсмоізоляції на основі гумових і гумометалевих елементів. За останні 30 років у Японії, США, Китаї, Новій Зеландії, Італії та в інших країнах побудовано тисячі будівель і споруд із системами сейсмоізоляції. Захист багатоповерхових будівель і споруд від потужних землетрусів виконують із використанням гумометалевих багатошарових сейсмоопор зі свинцевими сердечниками. Однак технологія виробництва (вулканізація) гумометалевих багатошарових сейсмоопор значно складніша, ніж гумових. Тому за будівництва малоповерхових будинків із сейсмоізоляцією бажано використовувати високодемпфуючі гумові сейсмоопори зі свинцевими сердечниками. Для отримання фактичних жорсткісних та демпфуючих характеристик гумових сейсмоопор уперше в Україні у 2021 р. проведено натурні динамічні дослідження двоповерхового великопанельного житлового будинку. Будинки з металевим каркасом (зокрема й модульні) мають низькі параметри демпфування, тож для захисту від потужних землетрусів необхідно використовувати демпфери.

Розглянемо обґрунтування (на основі динамічних випробувань дослідного натурального двоповерхового житлового будинку) можливості використання системи сейсмічного захисту у рівні фундаменту на основі гумових сейсмоопор зі свинцевими сердечниками. Сейсмозахист модульних одноповерхових будинків із металевим каркасом виконуватимемо методом зниження спектрального коефіцієнта динамічності конструкцій та встановлення демпферів у рівні покриття між двома модулями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Найбільшу кількість (до десяти тисяч) будівель і споруд із системами сейсмічного захисту побудовано в Японії упродовж 2000–2020 рр. у сейсмоактивних зонах (вісім–дев'ять балів). У доповідях японських фахівців [3–4] наведено дані експериментальних досліджень багатошарових гумометалевих опор. Наголошено, що такі опори перевіряли за дії інтенсивних землетрусів у Японії, Новій Зеландії та в інших країнах; будівлі з багатошаровими гумометалевими опорами експлуатуються понад 40 років без заміни й витримали потужні землетруси (вісім і дев'ять балів). Конструкції будівель із системами сейсмоізоляції мали незначні пошкодження при землетрусах до дев'яти балів. Водночас багато будівель без систем сейсмоізоляції було зруйновано.

Конструкції багатошарових гумометалевих сейсмоопор, методи розрахунку їхніх параметрів та приклади сейсмоізоляції будівель у США та інших країнах наведено в монографії [5] та нормах США [12]. Досвід сейсмоізоляції будинків у Вірменії наведено у [6].

Високої сейсмостійкості будинків із сейсмоізоляцією досягають зниженням відносних горизонтальних переміщень поверхів перекриттів (перекосів поверхів) під час землетрусу. Внаслідок вищої горизонтальної жорсткості поверхів верхньої будови будівлі порівняно з горизонтальною жорсткістю сейсмоопор, відносні горизонтальні переміщення перекриттів поверхів, розташованих вище за систему сейсмоізоляції, істотно нижче порівняно з переміщеннями поверхів будівлі без сейсмоізоляції.

У праці [7] для оцінки механізмів прогресивного руйнування модульних десятиповерхових будівель із сталевими рамами при сейсмічних впливах, визначених згідно з нормами Австралії, використовували лінійний та нелінійний статичні та нелінійний динамічний розрахунки, виконані методом скінченних елементів за допомогою програмного комплексу SAP2000. Наголошено, що сучасне будівництво розвивається в напрямку пошуку нових, ефективніших та економічніших технологій. Одним із таких напрямків є модульне будівництво.

Були проведені численні дослідження двох моделей десятиповерхових каркасних модульних будівель висотою 35,4 м. Ці дві будівлі мають схожі площі плану з різними прогонами, балками та колонами. Використовували в'язі у вигляді шевронних та хрестоподібних розпірок.

В Україні проведено експериментальні дослідження з визначення статичних і динамічних характеристик гумових та гумометалевих сейсмозахисних опор [8], розроблено вимоги до проектування систем сейсмоізоляції [10], які включено в державні норми [1]. Розроблено способи сейсмозахисту багатоповерхових житлових будинків (зокрема й великопанельних), які запатентовано [9] та використано за будівництва житлових будинків у сейсмічних зонах із розрахунковою інтенсивністю шість–вісім балів. Подамо результати натурних динамічних досліджень двоповерхового дослідного великопанельного будинку з використанням гумових сейсмоопор зі свинцевими сердечниками (випробування проведено у 2021 р. в Україні вперше).

Постановка завдання. В Україні на 2024 р. побудовано і здано в експлуатацію такі житлові будинки висотою від шести до 27 поверхів: у м. Львові комплекс із трьох будівель (шість, десять та 13 поверхів) із захистом від сейсмічних впливів інтенсивністю сім балів та залізничного транспорту по вул. Під Дубом; у м. Києві десятиповерховий комплекс із десяти будинків по вул. Кіквідзе із системою сейсмовіброзахисту від впливу поїздів метро і комплекс із трьох 27-поверхових будівель із системою сейсмовіброзахисту від впливів потягів метро по Оболонському проспекту. У м. Одесі запроєктовано та розпочато будівництво двох 27-поверхових житлових будинків по вул. Генуезькій із захистом від землетрусів інтенсивністю сім балів.

Для обґрунтування можливості сейсмоізоляції малоповерхових будинків із використанням гумових опор зі свинцевими сердечниками необхідні динамічні дослідження, що дасть змогу визначити фактичні динамічні характеристики сейсмоопор. Для оцінки сейсмостійкості конструкцій двоповерхового великопанельного житлового будинку та модульного будинку з металевим каркасом і демпферами виконано лінійні та нелінійні розрахунки моделей будинків із використанням програмного комплексу (ПК) ЛІРА-САПР 2024 [11].

Наше завдання – провести натурні динамічні дослідження дослідного зразка двоповерхового великопанельного житлового будинку із системою сейсмоізоляції та за її відсутності, а також численних досліджень просторових моделей великопанельного будинку та модульного будинку з металевим каркасом і демпферами в рівні покриття двох

модулів. Методи досліджень – динамічні випробування великопанельного будинку, лінійні та нелінійні розрахунки чисельних моделей із використанням ПК ЛІРА-САПР 2024.

Виклад основного матеріалу.

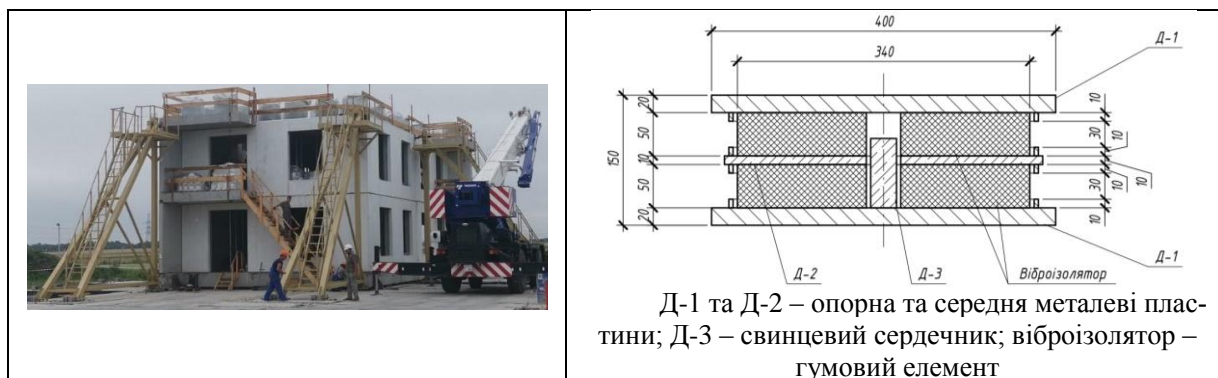
Об'єкти досліджень.

1. Дослідний зразок великопанельного житлового будинку (рис. 1, а) має два поверхи, висота кожного – 3,2 м. Розміри будинку в плані – 14,4×8,3 м. Конструктивна система будинку – безкаркасна, із несучими зовнішніми та внутрішніми стінами. Фундамент – стрічковий. Загальна маса будинку – 300 т. Конструкції стін – панелі стінові внутрішні несучі й панелі стінові зовнішні несучі, шаруваті, заводського виготовлення. Перекриття та покриття – плити залізобетонні багатопустотні попередньо напружені й монолітні ділянки. Матеріали залізобетонних несучих конструкцій: важкий бетон класу С20/25, арматурний прокат класів А500С, А240С за ДСТУ 3760-2019. Під усіма стінами фрагменту передбачено влаштування монолітної залізобетонної балки, яка опирається на фундамент через 15 гумометалевих опор. Високодемпфуючі сейсмоопори складаються з верхньої, нижньої та середньої металевих пластин і двох гумових віброізоляторів, виготовлених на основі натурального каучуку. Для підвищення демпфування (дисипації сейсмічної енергії під час землетрусу) по осі симетрії опори встановлено свинцевий сердечник (рис. 1, б). Для прикладання горизонтального навантаження під час випробування дослідного зразка передбачено влаштування переставних металевих опор – контрфорсів. Власні горизонтальні коливання будинку збуджували методом миттєвого зняття навантаження в рівні покриття будинку.

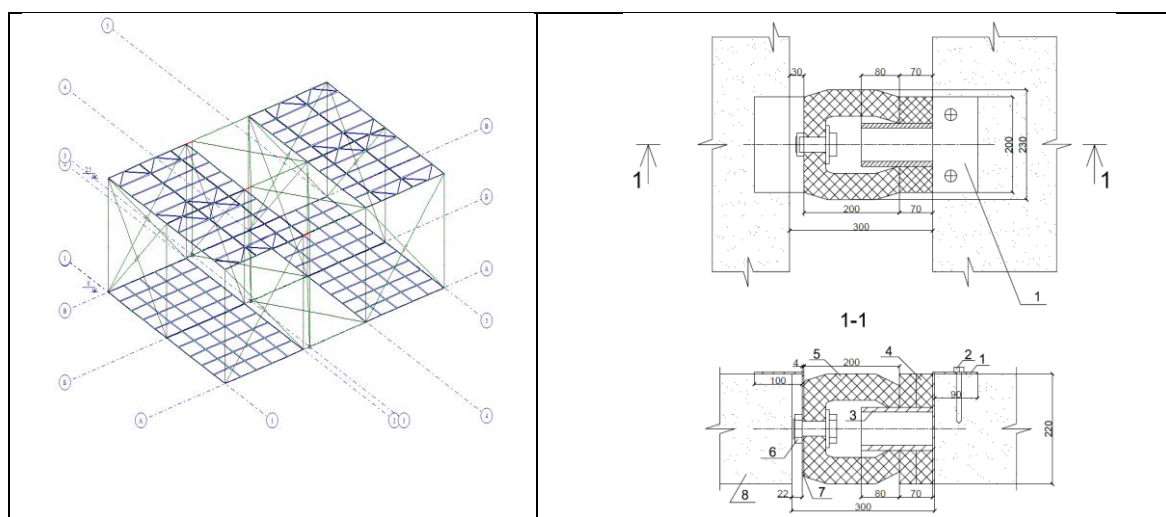
2. Дослідний одноповерховий зразок модульного будинку з металевим каркасом складається із двох модулів заводського виготовлення з розмірами кожний у плані 2,5×5,0 м (у осях 1-2/А-В та 4-5/А-В) та висотою 2,5 м (рис. 2, а). Розміри модулів будинку прийнято з урахуванням допустимих габаритів при перевезенні автотранспортом із місця виготовлення на будівельний майданчик. Для збільшення площі будинку (відстань між осями 1-5 – 7,3 м) та забезпечення сейсмостійкості конструкцій модулі розділено антисейсмічним швом завширшки 300 мм (між осями 2–3 на рис. 2, а). У рівні покриття модулів у антисейсмічному шві передбачено встановлення трьох гумових демпферів (червоні елементи (рис. 2, а)) для підвищення параметрів демпфування металевого каркасу. Регулювання частот власних коливань каркасів модулів будинку з метою зниження

сейсмічних горизонтальних навантажень виконують за допомогою вертикальних металевих в'язей

та застосуванням конструкцій зі зменшеною вагою (сандвич-панелей).



а) б)
Рис. 1. Загальний вигляд дослідного зразка великопанельного будинку при випробуваннях (а) та схема гумометалевої сейсмоопори (б)



а) б)
Рис. 2. Розрахункова модель модульного будинку (а) та схема гумового демфера (б)

Результати динамічних досліджень великопанельного будинку. Метою проведення вібродинамічних досліджень є визначення фактичних динамічних характеристик (частот і декрементів коливань) та рівнів зареєстрованих віброприскорень конструкцій двоповерхового дослідного фрагменту за миттєвого зняття навантаження у рівні покриття фрагменту.

Завданнями вібродинамічних досліджень є:

- реєстрація горизонтальних та вертикальних коливань конструкцій фрагменту для двох етапів випробувань: перший етап – фрагмент із системою сейсмоізоляції (15 гумометалевих сейсмоопор встановлено у рівні фундаменту); другий етап – сейсмоопори, виключені з роботи;
- обробка отриманих даних вимірювань і побудова часових сигналів та вузькосмугових спектрів віброприскорень конструкцій;

- визначення частот власних коливань, декрементів коливань, амплітуд горизонтальних та вертикальних віброприскорень будівельних конструкцій фрагменту;
- порівняння динамічних характеристик сейсмоізованого та неізованого дослідного фрагменту;
- визначення фактичної жорсткості сейсмоопор на зсув.

Вібросигнали реєстрували із використанням автономної багатоканальної системи моніторингу будівельних конструкцій «Сейсмомоніторинг», до складу якої входять:

- три модулі вимірювання низькочастотних вібросигналів МВНВ-01 з однокомпонентними датчиками прискорень марки 731А;
- ноутбук із програмним забезпеченням «Сейсмомоніторинг» для реєстрації та обробки вібросигналів; з'єднувальні кабелі.

Модуль вимірювання низькочастотної вібрації МВНВ-01 розроблений у НТУ «КПІ» фірмою «Діатос» (м. Київ). Датчики вібрації (акселерометри) марки 731А розроблені фірмою «Wilcoxon research» (США).

Методика вібродинамічних досліджень розроблена відповідно до положень ДСТУ 12.1.012:2008 [13] та передбачає вимірювання віброприскорень у двох горизонтальних (уздовж осей X і Y) та вертикальному (Z) напрямках. Інтенсивність коливань будинку та сейсмічних навантажень визначено згідно з чинними державними нормами [1] та шкалами сейсмічної інтенсивності за ДСТУ [13].

Перший і другий етапи вібродинамічних досліджень передбачають записи коливань відповідно сейсмоізолизованого будинку та за виключення із роботи сейсмоопорах при миттєвому знятті горизонтального навантаження 80 кН у рівні покриття.

Відповідно до розробленої методики реєстрували:

- горизонтальні коливання плити покриття дослідного будинку в напрямку цифрових та літерних осей;
- горизонтальні коливання дослідного будинку при встановленні датчиків вібрації на різних відмітках (на залізобетонному монолітному поясі,

на перекритті першого поверху та на покритті) за динамічних впливів у напрямку цифрових та літерних осей;

- вертикальні коливання плити перекриття першого поверху та покриття.

Відповідно до розробленої методики динамічних досліджень дослідного зразка будинку реалізували такі схеми розташування акселерометрів (рис. 3, а):

Схема 1 – призначена для вимірювання горизонтальних віброприскорень плити покриття будинку в напрямку цифрових осей 8–10.

Схема 2 – призначена для вимірювання горизонтальних віброприскорень плити покриття у напрямку літерних осей.

Схема 3 – призначена для вимірювання горизонтальних віброприскорень конструкцій будинку одночасно на залізобетонному монолітному поясі, на перекритті першого поверху та на покритті при динамічних впливах у напрямку цифрових або літерних осей.

Схема 4 – призначена для вимірювання вертикальних коливань плит перекриття та покриття при імпульсних вертикальних навантаженнях.

Загальний вигляд гумометалевих сейсмоопор показано на рис. 3, б.

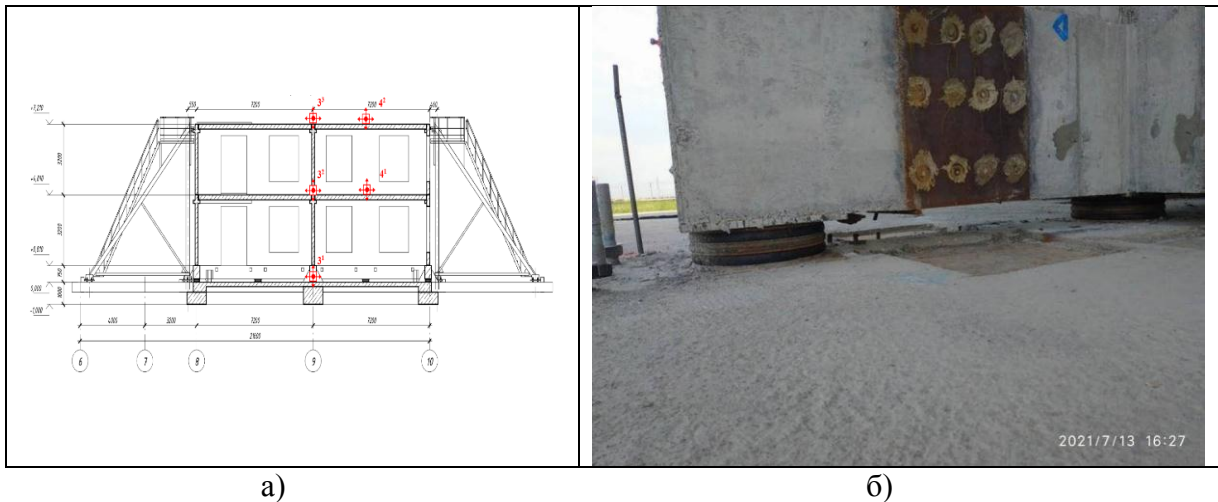
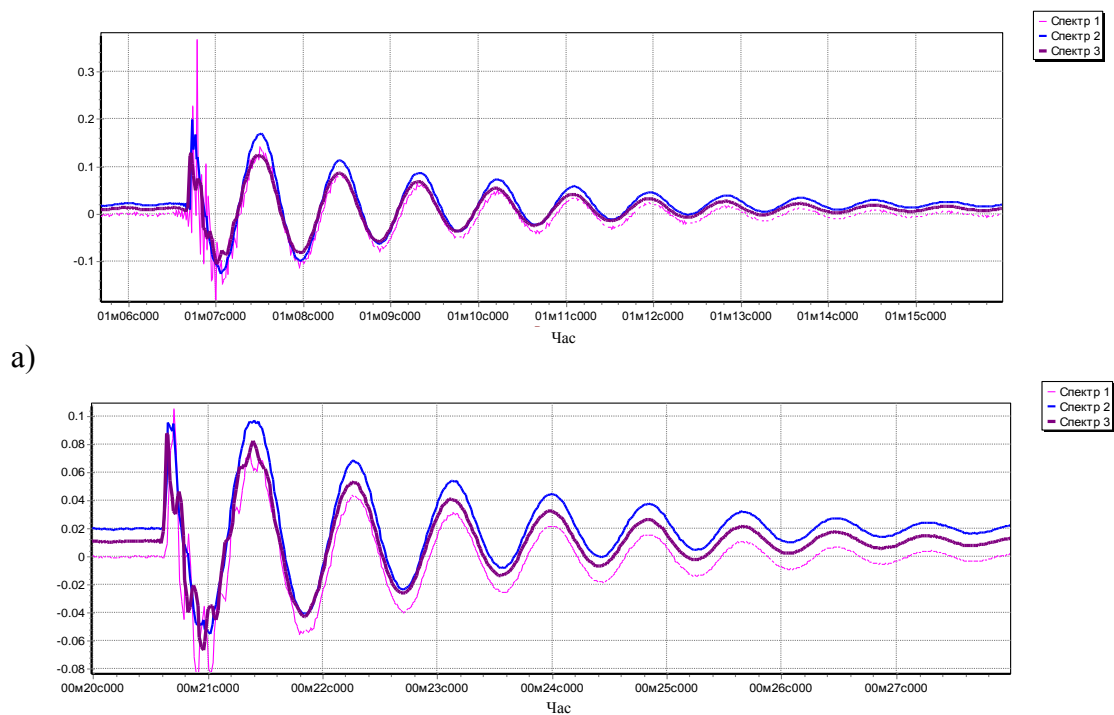


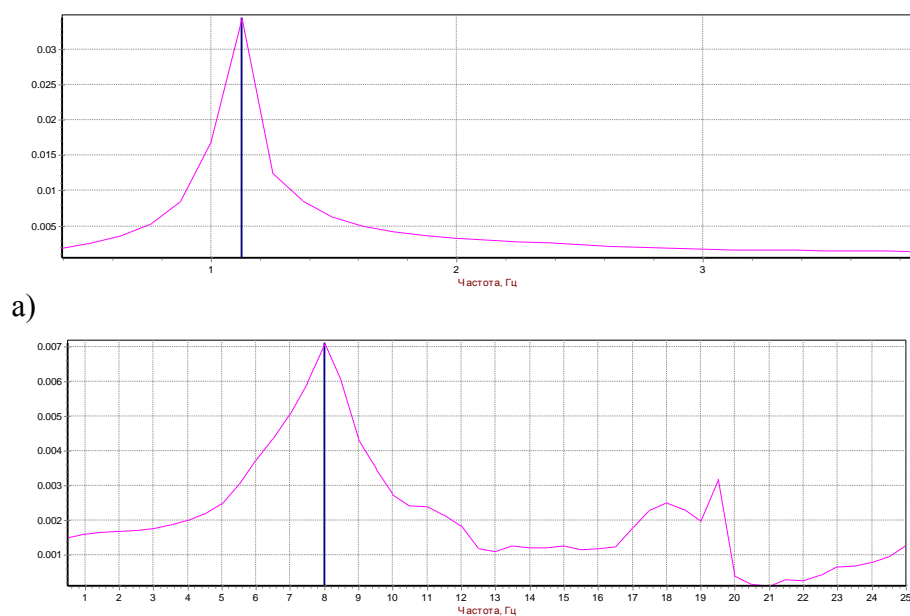
Рис. 3. Схема розстановки датчиків вібрації (акселерометрів – червоні квадрати) на стінах та плитах перекриття і покриття великопанельного будинку при випробуваннях (а) та загальний вигляд гумометалевих сейсмоопор, встановлених під стінами будинку (б)

За результатами вібродинамічних досліджень будинку зареєстровані часові сигнали вібро-

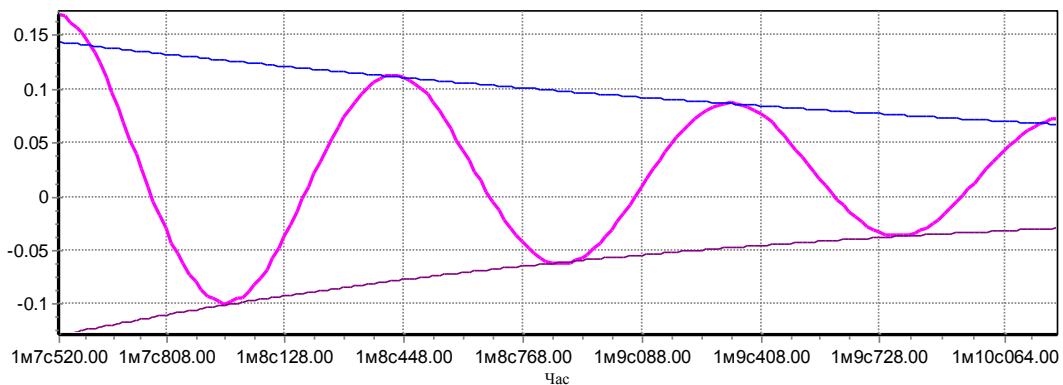
прискорень конструкцій будинку, отримано вузькосмугові спектри та логарифмічні декременти коливань (рис. 4–6).



а)
 б)
 Рис. 4. Зареєстровані часові сигнали горизонтальних віброприскорень фрагменту (до прикладання статичних горизонтальних навантажень) за напрямком літерних осей (а) та цифрових (б). Схеми 3 та 4 – при встановленні акселерометрів на різних позначках: червона лінія – на залізобетонному монолітному поясі над сейсмоопорами; коричнева – на перекритті першого поверху; синя – на покритті



а)
 б)
 Рис. 5. Вузкосмугові спектри горизонтальних віброприскорень покриття будинку за миттєвого зняття горизонтального навантаження $P^2 = 80$ кН з покриття: а – будинок встановлено на 15-ти сейсмоопорах, частота $f = 1,13$ Гц (період $T = 0,9$ с); б – сейсмоопори виключено з роботи, частота власних коливань $f = 8,0$ Гц (період $T = 0,13$ с)



а)

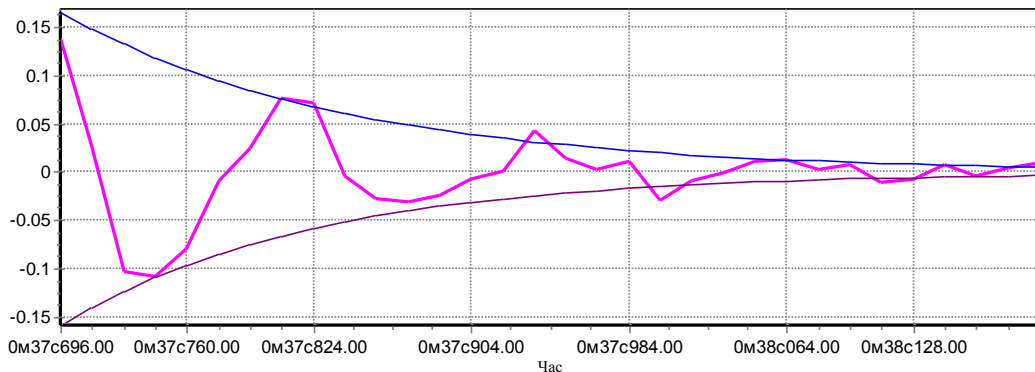


Рис. 6. Логарифмічні декременти коливань: а – будинок встановлено на 15 сейсмоопорах, декремент дорівнює 0,5 до статичних навантажень; б – сейсмоопори виключено з роботи, декремент дорівнює 0,54 після випробувань статичними знакозмінними навантаженнями, еквівалентними сейсмічним інтенсивністю 8 балів

За результатами натурних вібродинамічних випробувань двоповерхового великопанельного будинку із системою сейсмозахисту у рівні фундаменту (сейсмоізольована конструкція) та за відсутності сейсмоізоляції отримано:

А. Будинок із системою сейсмозахисту:

1. Частота власних горизонтальних коливань сейсмоізольованого двоповерхового будинку до початку випробувань та після статичних знакозмінних навантажень послідовно з чотирьох сторін фрагменту до 1600 кН (еквівалентно сейсмічним навантаженням 8 балів) зареєстрована в діапазоні 1,0–1,13 Гц (період $T = 1,0\text{--}0,9$ с). Значення періоду дало змогу отримати експериментальне значення жорсткості сейсмоопор на зсув $K = 850$ кН/м.

2. Значення логарифмічних декрементів коливань (при перших двох-трьох циклах коливань) дорівнюють 0,4–0,5 як до початку випробувань статичними навантаженнями, так і після статичних знакозмінних навантажень 1600 кН послідовно з чотирьох сторін фрагменту. Зареєстровані значення декрементів коливань дозволяють рекомендувати під час розрахунків будівель із запропонованим типом сейсмоізоляторів приймати демпфування 8 % від критичного загасання.

Б. Будинок із виключеними з роботи сейсмоопорами (неізольована конструкція).

1. Зареєстровані частоти власних горизонтальних коливань неізольованого дослідного будинку до початку випробувань та після статичних знакозмінних навантажень послідовно з чотирьох сторін фрагменту до 1600 кН. До початку статичних завантажень частота у напрямку літерних осей становила $f = 10,0$ Гц (період $T = 0,1$ с), у напрямку цифрових осей $-f = 8,0$ Гц (період $T = 0,13$ с). Після статичних знакозмінних навантажень частота у напрямку літерних осей становила $f = 8,9$ Гц, у напрямку цифрових осей $-f = 7,6$ Гц. Отож, жорсткість стінових конструкцій на зсув зменшилась у 1,26 та в 1,1 раза, відповідно у напрямку літерних та цифрових осей.

2. Спектральний коефіцієнт динамічності згідно з чинними нормами України [1] для ґрунтів другої категорії дорівнює 2,5 для фактичного періоду власних коливань неізольованого будинку: $T = 0,1\text{--}0,13$ с, що відповідає максимальним сейсмічним навантаженням на несучі конструкції.

3. Зареєстровані значення логарифмічних декрементів коливань дають підстави рекомендувати під час розрахунків великопанельних будівель без сейсмоізоляції приймати демпфування від

7 % (при семи балах) до 10 % (при восьми балах) від критичного загасання.

4. Частота власних вертикальних коливань плити перекриття першого поверху будинку до прикладання статичних горизонтальних навантажень становила $f = 12,8$ Гц. Після прикладання з чотирьох сторін фрагменту статичних горизонтальних навантажень 1600 кН частота власних вертикальних коливань плити перекриття не змінилась і становила $f = 12,8$ Гц. Отже, при статичних горизонтальних навантаженнях, еквівалентних за інтенсивністю восьми балам, не зареєстровано зменшення згинальної жорсткості плити перекриття першого поверху дослідного фрагменту.

5. Частота власних вертикальних коливань плити покриття будинку до прикладання статичних горизонтальних навантажень становила $f = 12,5$ Гц. Після прикладання з чотирьох сторін будинку статичних горизонтальних навантажень 1600 кН, а також одноразового навантаження 2400 кН (відповідає 8,5 бала) у напрямку цифрових

осей частота власних вертикальних коливань плити покриття фрагменту не змінилась і становила $f = 12,5$ Гц. Отже, за статичних горизонтальних навантажень, еквівалентних за інтенсивністю більше ніж восьми балам, не зареєстровано зменшення згинальної жорсткості плити покриття.

Результати розрахунків лінійних та нелінійних моделей будинків. Розрахунки динамічної лінійної просторової моделі великопанельного будинку (рис. 7) виконані відповідно до вимог ДБН [1] для двох варіантів: за жорсткого з'єднання монолітного пояса із фундаментом; із сейсмоізоляцією у рівні монолітного пояса на першому поверсі. У результаті проведених розрахунків у програмному комплексі (ПК) ЛІРА САПР [11] отримані динамічні характеристики моделі великопанельного будинку за головними формами власних коливань (рис. 7, а, табл.) і модульного каркасного будинку (рис. 7, б).

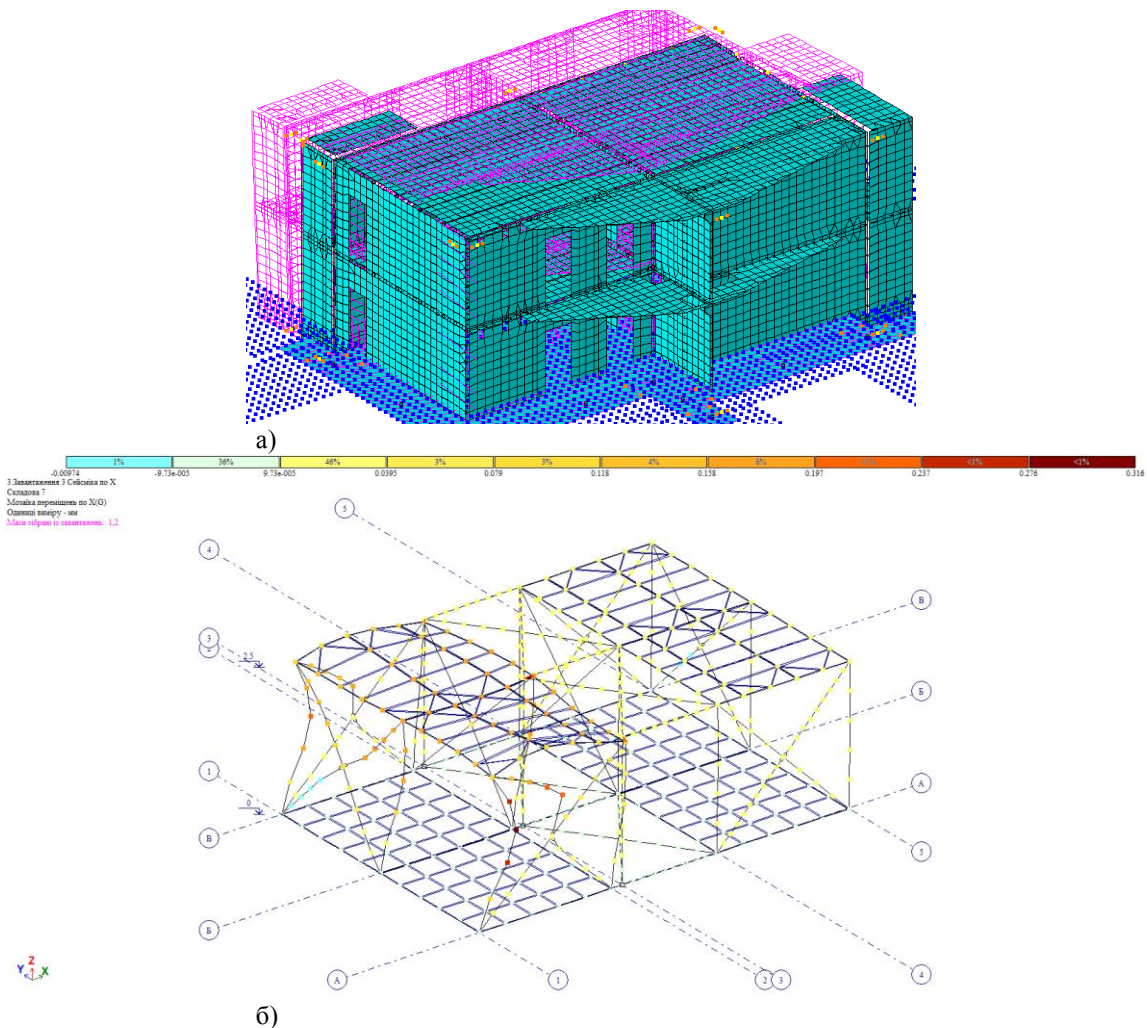


Рис. 7. Головні форми власних коливань: а – великопанельний будинок (поступальні коливання на 15 сейсмоопорах із частотою 0,9 Гц вздовж цифрових осей); б – модульний будинок (коливання модуля в осях 1-2/А-В з частотою 28,3 Гц вздовж літерних осей)

Просторова нелінійна модель дослідного фрагменту розроблена на основі лінійної моделі із заміною типів скінчених елементів на нелінійні. Армування несучих конструкцій прийнято згідно з проектом. При цьому враховано як польове, так і контурне армування навколо віконних та дверних отворів.

Аналіз результатів нелінійних розрахунків у ПК ЛІРА САПР напружено-деформованого стану конструкцій дослідного ізоляованого та неізоляованого будинку показав таке. Від сейсмічних навантажень 1600 кН (вісім балів) тріщини в панелях та

плитах перекриття й покриття ізоляованого будинку відсутні.

У неізоляованому будинку розрахункове максимальне значення ширини розкриття тріщин у стінових панелях дорівнює 0,12 мм (рис. 8, а), у перемичках від згинальних моментів до 0,08 мм (рис. 8, б). Відповідно до даних випробувань будинку за горизонтальних навантажень 1600 кН (вісім балів) максимальна ширина розкриття тріщин 0,1 мм зареєстрована у кутах дверного отвору стінової панелі по осі 9.

Таблиця

Розрахункові динамічні характеристики сейсмоізоляованого великопанельного будинку

№ форми власних коливань	Частота, Гц	Період, с	Σ модальних мас, %, за сейсмічного впливу вздовж осей	
			літерних (X)	цифрових (Y)
1	0,90	1,10	1,90	97,64
2	0,91	1,08	99,71	99,52
3	1,34	0,74	99,76	99,63

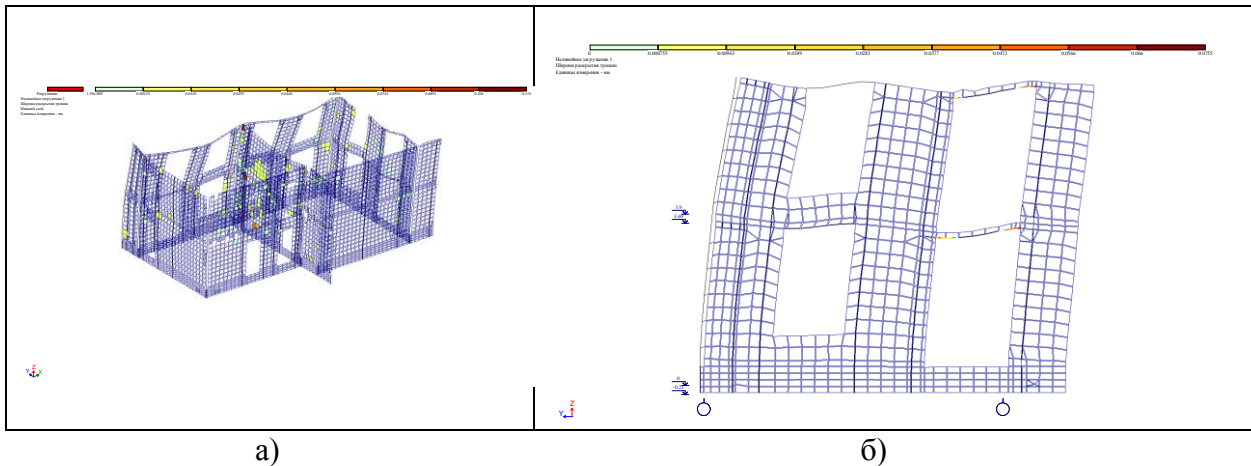


Рис. 8. Розрахункова ширина розкриття тріщин у стінових панелях – до 0,12 мм (а), та в перемичках панелі – до 0,08 мм (б) неізоляованого великопанельного будинку

Висновки. 1. Використання сейсмоізоляції великопанельного будинку дає змогу знизити сейсмічні горизонтальні навантаження в період коливань будинку на гумометалевих сейсмоопорах $T = 1,0$ с і більше. Цього досягають зменшенням значення спектрального коефіцієнта динамічності. Згідно з чинними нормами України [1] для ґрунтів другої категорії коефіцієнт динамічності дорівнює $\beta = 1,7$ для періоду власних коливань будинку на сейсмоопорах $T = 1,0$ с, що менше за максимальне значення 2,5 і відповідає зниженню сейсмічних навантажень в 1,5 раза.

2. Запропоновано конструктивне рішення та проведено чисельні дослідження модульного

одноповерхового будинку з металевим каркасом, у якому зниження сейсмічних горизонтальних навантажень до 1,7 раза забезпечується динамічними параметрами модулів (період горизонтальних коливань одноповерхового модуля має бути не більшим ніж $T = 0,04$ с та використанням демпферів, встановлених у рівні покриття між двома модулями заводського виготовлення.

3. Відповідно до результатів випробувань сейсмоізоляованого двоповерхового великопанельного будинку, конструкції запропонованих високодемпфуючих гумометалевих опор (демпфування становить 8% від критичного загасання) можна використовувати у системах сейсмічного захисту ма-

лоповерхових будинків у високосейсмічних районах із розрахунковою інтенсивністю сейсмічного впливу вісім та дев'ять балів.

4. Вирішення проблеми забезпечення житлом постраждалих під час війни мешканців за короткий строк можливе за будівництва збірних малоповерхових великопанельних та каркасних модульних будинків заводського виготовлення. У сейсмічно активних районах України (за інтенсивності землетрусів вісім та дев'ять балів) забезпечення сейсмостійкості таких будинків потребує сейсмосахисту з використанням гумометалевих сейсмоопор і демпферів.

5. Розроблено та запатентовано [9] спосіб захисту великопанельних будинків із використанням гумометалевих опор, які виготовляють на основі натурального каучуку. Вперше в Україні проведено натурні динамічні дослідження дослідного зразка двоповерхового великопанельного будинку із сейсмоізоляцією.

Бібліографічний список

1. ДБН В.1.1-12:2014. Будівництво у сейсмічних районах України / Мінрегіонбуд України. Київ, 2014.
2. Єврокод 8: Проектування сейсмостійких конструкцій. Частина 1: Загальні правила, сейсмічні дії і правила для будівель. Європейський стандарт EN 1998-1:2004.
3. Masaru Kikuchi, Nobuyuki Ogino. Seismic Isolation Devices. Principle and application of SI devices, introduction of examples. *International seminar "Technologies of earthquake-resistant construction"* Sep 17-19 2018, Almaty, Kazakhstan, 2018.
4. Keita Sakakibara. Structural design for seismic isolation. *International seminar "Technologies of earthquake-resistant construction"*, 2021. February 8–9. Bichkek, Kirgistan, 2021.
5. Kelly J. M. *Base Isolation: Linear Theory and Design*. Berkeley, 1990.
6. Melkumyan M. G. Base Isolation Retrofitting Design for the Existing 9-Story Large-Panel Apartment Building. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD)*. 2020. Vol. 4. Issue 4.
7. Analyses of Structural Robustness of Prefabricated Modular Buildings: A Case Study on Mid-Rise Building Configurations. Thisari Munmulla, Satheeskumar Navaratnam, Julian Thamboo, Thusiyanthan Ponnampalam, Hidallana-Gamage, Hasitha Damruwan, Konstantinos Daniel Tsavdaridis, Guomin Zhang, MDPI, 22 August 2022. <https://doi.org/10.3390/buildings12081289>.
8. Экспериментальные исследования характеристик сейсмозащитных опор / А.Ф. Булат, В.И. Дырда, Н.И. Лисица, Н.Г. Марьенков [и др.]. *Геотехническая механика*. Днепропетровск: Авантаж, 2015. Вып. 121.
9. Фаренюк Г. Г., Немчинов Ю. І., Мар'єнков М. Г., Бабік К. М., Лисиця М. І. та ін. Спосіб захисту великопанельних багатоповерхових будинків від землетрусів та осідань основи. Патент UA 155402. 28.02.2024.
10. Проектирование зданий с заданным уровнем обеспечения сейсмостойкости / [Ю. И. Немчинов, Н. Г. Марьенков, А. К. Хавкин, К. Н. Бабик. Под ред. Немчинова Ю. И.]. Киев, 2012. 384 с.
11. «ЛИРА-САПР». Руководство пользователя. Обучающие примеры / под ред. академика АИН Украины А.С. Городецкого. Электронное издание. 2017. 535 с.
12. Норми США «Noise and Vibration Assessment Methodology. 2007».
13. ДСТУ 12.1.012-2008. ССБТ. Вібраційна безпека. Київ, 2008.
14. ДСТУ Б В.1.1-28 Шкала сейсмічної інтенсивності. Київ: Мінрегіонбуд України, 2016.

Стаття надійшла 18.06.2024