

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 69.032.22:699.841

Р. О. ТИМЧЕНКО<sup>1\*</sup>, Д. А. КРИШКО<sup>2</sup>, В. О. БИХНО<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Кафедра «Промислового, цивільного і міського будівництва», Криворізький національний університет, вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна, тел. +38 (097) 295 83 53, ел. пошта radomirtimchenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-0684-7013

<sup>2</sup>Кафедра «Промислового, цивільного і міського будівництва», Криворізький національний університет, вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна, тел. +38 (067) 709 17 74, ел. пошта dak.sf.amb@gmail.com, ORCID 0000-0001-5853-8581

<sup>3</sup>Кафедра «Промислового, цивільного і міського будівництва», Криворізький національний університет, вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна, тел. +38 (067) 347 56 76, ел. пошта valeron1206@gmail.com, ORCID 0009-0003-7355-0521

### СЕЙСМОСТІЙКИЙ КАРКАС ВИСОТНОЇ БУДІВЛІ

**Мета.** Метою даної роботи є розгляд варіанту підвищення сейсмостійкості каркасу висотної будівлі за допомогою використання енергопоглинача у в'язевих вузлах рамно-в'язової схеми, що зменшить передачу динамічних навантажень від сейсмічних коливань на вузли рам завдяки частковому розсіюванню та зменшенню амплітуди цих коливань у в'язевих вузлах. **Методика.** Розгляд основних існуючих конструктивних схем висотних будівель та аналіз переваг і недоліків рамно-в'язової схеми висотної будівлі, аналіз впливів сейсмічних коливань на вузли конструктивної схеми висотної будівлі. Представлення варіанту підвищення сейсмостійкості каркасу висотної будівлі за допомогою додавання до каркасу пластичних вузлів та використання енергопоглинача у в'язевих вузлах рамно-в'язової схеми, що зменшить передачу динамічних навантажень від сейсмічних коливань на вузли рам завдяки частковому розсіюванню та зменшенню амплітуди цих коливань у в'язевих вузлах. **Результати.** На основі результатів аналізу, запропоновано метод підвищення сейсмостійкості каркасу висотної будівлі за допомогою використання нових конструктивних рішень, що дозволило б зменшити сейсмічний вплив на вузли каркасу. На основі задачі представлено комбіноване рішення: використання пластичних вузлів у з'єднаннях колон та ригелів каркасу для зменшення моментів у вертикальних несучих елементах, запропонована конструктивна модель енергопоглинача для додаткового гасіння коливань за висотою будівлі, та розглянутий принцип його роботи під час впливу сейсмічних коливань; детально описані конструктивні елементи енергопоглинача у в'язевих вузлах, та їх взаємодія між собою. **Наукова новизна.** Виконано аналіз існуючих конструктивних схем висотних будівель. Розглянутий варіант сейсмостійкого каркасу висотної будівлі рамно-в'язової конструктивної схеми з енергопоглиначем, детально описане його конструктивне рішення та принцип його роботи. **Практична значимість.** Технічний результат запропонованого варіанту сейсмостійкого каркасу полягає у підвищенні сейсмостійкості та надійності рамно-в'язевих висотних будівель за допомогою влаштування в'язевих вузлів з енергопоглиначем, без використання додаткових окремих сейсмогасителів.

*Ключові слова:* висотна будівля; конструктивна схема; в'язі, енергопоглинач; демпфер; сейсмостійкість

#### Вступ

З розвитком висотного будівництва було зроблено кілька конструктивних схем таких будівель: рамно-в'язова, каркасна з діафрагмами жорсткості, безкаркасна з перехресно-несучими стінами, ствольна, каркасно-ствольна, коробчаста (оболонкова), ствольно-коробчаста («труба в-трубі» або «труба-в-фермі») (рис. 1). Вибір тієї чи іншої конструктивної схеми залежить від багатьох факторів, основними з яких є висота будівлі, умови будівництва (сейсмічність, ґрунтові особливості,

вітрові навантаження), архітектурно-планувальні вимоги (Гетун, 2019).

Жорсткість та стійкість висотної будівлі залежить від ряду факторів, включаючи форму, жорсткість, масу та здатність протистояти сейсмічним навантаженням. У той час як вплив форми можна оцінити за допомогою випробувань в аеродинамічній трубі, а масу та жорсткість можна передбачити з достатньою точністю проєктувальником конструкцій, то варіанти вибору типу сейсмогасителів та підвищення стійкості будівель є дуже різноманітними, їхні конструкції займають певний об'ємно-

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

планувальний простір, зменшуючи корисну площу окремих поверхів будівлі (Белаш, 2009).

Конструкція з жорстким каркасом – це конструкція, що складається з лінійних елементів, як правило, ригелів і колон, які з'єднані один з одним на своїх кінцях за допомогою з'єднань, які не допускають відносного обертання між кінцями елементів (Rezaei, 2016). Це робить дану схему ненадійною під час сейсмічних впливів через небезпеку виникнення надлишкових моментів у вузлах конструктивної схеми, а особливо у колонах нижніх поверхів будівлі, що створить небезпеку їх руйнування.

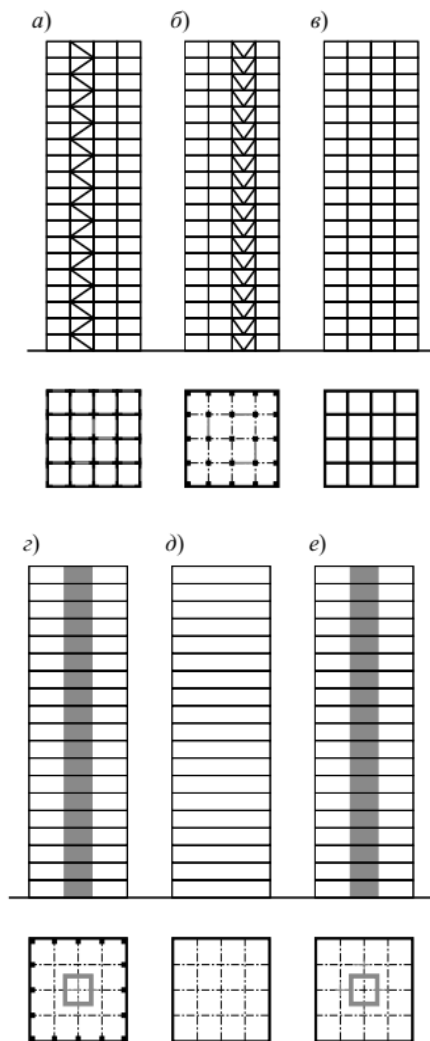


Рис. 1. Конструктивні схеми будівель:  
а) рамно-в'язева; б) каркасна з діафрагмами жорсткості; в) безкаркасна з перехресно-несучими стінами; г) ствольна; д) коробчаста (оболонкова); е) ствольно-коробчаста («труба-в-трубі» або «труба-в-фермі»)

Додавши до конструктивної схеми висотної будівлі додаткову систему енергопоглинання (демпфування), можна досягти ефекту «гасіння» амплітуди сейсмічних коливань окремими вузлами конструктивної схеми будівлі. Це покращує надійність прогнозів динамічної реакції, та забезпечує більш високий рівень сейсмостійкості, суттєво знижує необхідну кількість необхідних жорстких вузлових з'єднань у вузлах конструктивної схеми, водночас покращуючи ефективність її роботи.

### Мета

Метою даної роботи є розгляд варіанту підвищення сейсмостійкості каркасу висотної будівлі за допомогою використання за допомогою використання енергопоглиначів у в'язевих вузлах рамно-в'язової схеми, що зменшить передачу динамічних навантажень від сейсмічних коливань на вузли рам завдяки частковому розсіюванню та зменшенню амплітуди цих коливань у в'язевих вузлах.

### Методика

Зокрема за основу запропонованої конструктивної схеми взята рамно-в'язева конструктивна схема – схема, функціонування, надійність та довговічність якої забезпечується жорсткими вузлами рам и в'язями.

Недоліком даної схеми є невисока сейсмостійкість через жорсткі з'єднання всіх вузлів конструктивної схеми. Під час дії сейсмічних коливань існує значний ризик порушення окремих конструктивних вузлів, перехід окремих вузлових з'єднань із жорстких у шарнірні, порушення початкової розрахункової схеми, і як наслідок зниження надійності і довговічності будівлі в цілому (рис. 2).



Рис. 2. Розрив колони при зварному з'єднанні ригель-колона після землетрусу

Крім того, в результаті експлуатації неминуче зниження жорсткості з'єднання прогонів та в'язів, як від фізично нелінійних процесів у самих конструкціях, так і внаслідок піддатливості в зонах стику «ригелі-колони-в'язі» (рис. 3).

Засоби протидії дії землетрусу зазвичай базуються на двох різних підходах:

Варіант 1: конструкції з досить великих перерізів, щоб в них виникали лише пружні деформації внаслідок дії всіх навантажень, зокрема і сейсмічних (рис. 4).

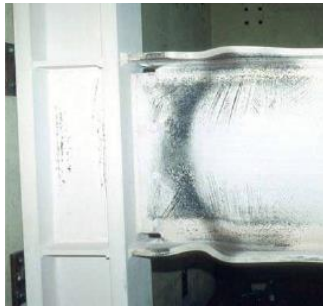
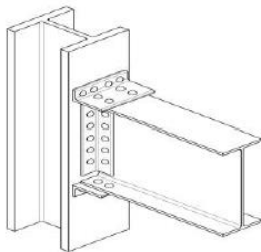


Рис. 3. Типова деформація металевого ригеля внаслідок виникнення надлишкових моментів при жорсткому з'єднанні з колоною.

а)



б)

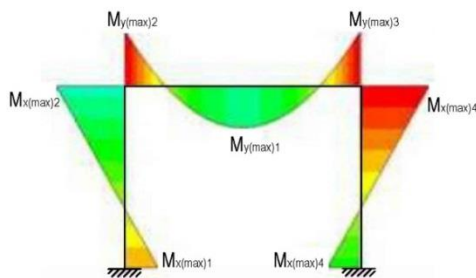
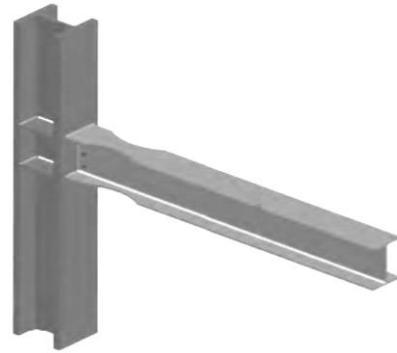


Рис. 4. Жорсткі вузли каркасу будівлі (варіант 1):  
 а) вузол жорсткого з'єднання колони і ригеля рами з додатковим куточками для сприймання моменту;  
 б) епюра моментів в комірці каркасу

Варіант 2: конструкції з менших перерізів несучих елементів, розроблені для пластичності (тобто для непружної поведінки без погір-

шення міцності). У цьому випадку допускається певний рівень пошкоджень структурних і неструктурних елементів (рис. 5).

а)



б)

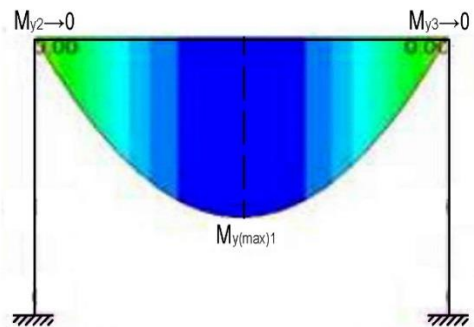


Рис. 5. Напівжорсткі вузли каркасу будівлі (варіант 2):

- а) вузол напівжорсткого з'єднання колони та ригелю (конструктивне рішення «міцна колона – слабкий ригель» зі зменшеним перерізом ригеля біля опорної зони);
- б) епюра моментів в комірці каркасу

Конструкція, спроектована за варіантом 1, буде важчою і може не забезпечувати запас міцності для покриття дій землетрусу, які є сильнішими за очікувані, оскільки руйнування елемента не є пластичним (тобто має низьку міцність). З'єднання колон і ригелів каркасу іноді виконують з додатковими куточками для протидії вітровому навантаженню та сприймання надлишкових моментів (рис. 4). Проте, навіть у цьому випадку загальна поведінка структури може виявитись «крихкою» (Rezaei, 2016).

В такому випадку, розсіювання сейсмічних коливань можна зобразити виразом:

$$W_c = W_k,$$

де:  $W_c$  – енергія від сейсмічних коливань, що впливає на будівлю;  $W_k$  – енергія, що розсію-

ється у конструктивних елементах та жорстких вузлах каркасу.

Реакція на сейсмічні коливання окремих вузлів та каркасу в цілому є слабо прогнозованою та небезпечною, оскільки перші непружні деформації через сейсмічний вплив розвиваються на колонах першого поверху. Однак ці колони не призначені для таких непружних деформацій (відсутність розсіювання енергії через циклічну поведінку), і тому, коли коливання збільшуються, деформації також відповідно збільшуються. Це призведе до руйнування колон першого поверху, що може призвести до повного обвалення будівлі. (Wood, 2012)

Зокрема, під час землетрусів Northridge-1994 і Kobe-1995 сотні будівельних жорстких каркасів були серйозно пошкоджені в місцях з'єднання ригелів з колонами, і було виявлено, що їх відновлення майже неможливе (Sharma, 2020). Основною причиною його дефіциту була концентрація напружень і пластичність у зварній зоні з'єднань.

Як наслідок, альтернатива зварним з'єднанням стала ключовою проблемою для різних дослідників. Декілька дослідників виявили, що завдяки використанню напівжорстких з'єднань (пластичних з'єднань) замість жорстких з'єднань ефективність каркасів була збільшена. Різні дослідження показали покращені характеристики напівжорстких каркасів у вигляді розсіювання енергії при сильних землетрусах з різним ступенем напівжорсткості. Експериментальні дослідження також показали, що напівжорсткі з'єднання мають певну пластичність і здатність розсіювати велику кількість сейсмічної енергії без критичних руйнувань. (Sharma, 2022).

Тому у конструктивній схемі, спроектованій згідно з варіантом 2, окремі частини конструкції навмисно розроблені таким чином, щоб піддатися циклічним пластичним деформаціям без руйнування, а конструкція сконструйована так, що тільки вибрані зони (пластичні вузли) будуть пластично деформовані. Загальна поведінка конструкції є «пластичною», і таким чином вона може розсіювати значну кількість енергії через утворення розподілених пластичних вузлів.

Одним із найпоширеніших рішень для отримання пластичної поведінки є використання конструктивного з'єднання за принципом «міцна колона – слабкий ригель» (див. рис. 5).

При такому рішенні непружні деформації

змушені відбуватися в балці, а не в колоні. Це призведе до більш пластичної поведінки, зменшуючи ризик руйнування. Тому дане конструктивне рішення може полегшити перенесення пластичної деформації від колони до балки під час землетрусу, тим самим запобігаючи виникненню в з'єднанні між колоною та балкою непружних деформацій.

Різні дослідження показали покращені характеристики напівжорстких каркасів у вигляді розсіювання енергії при сильних землетрусах з різним ступенем напівжорсткості. Експериментальні дослідження також показали, що напівжорсткі з'єднання мають певну пластичність і здатність розсіювати велику кількість сейсмічної енергії без значних руйнувань. (Sharma, 2022).

Важливим при цьому є застосування спеціалізованих високоміцних сталей В результаті покращення низки механічних властивостей подібні сталі набувають ще й додаткових корисних експлуатаційних властивостей таких як підвищення механічних характеристик за низьких та високих температур, покращені тріщиностійкість та зварюваність, збільшені показники ударної в'язкості (Банніков, 2023).

Також для підвищення стійкості будівельних конструкцій до прогресивного руйнування, зокрема металевих, необхідно враховувати можливість локального руйнування вже на етапі проектування будівлі (Іванова, 2023).

Окремо варто зупинитись на задачі додаткового розсіювання та гасіння коливань за високою будівлі для зменшення деформацій у вузлах каркасу. Як приводиться в (Белаш, 2009), введення в конструкцію будівлі нелінійних демпферних елементів, розміщених на кожному поверсі, дозволяє обмежити величину зсувів будівлі до основи при одночасному зниженні інерційних навантажень.

Вирішення цього питання можливе за допомогою розміщення в окремих комірках каркасу в'язей з енергопоглиначем (Тімченко, 2017). Запропонований енергопоглинач розміщений між спареними елементами в'язів, у вузлах їх перетину (рис. 6), що прикріплені однією стороною до колон і до ригелів з утворенням діагонально розміщених між ними зазорів, причому у вузлі діагонального перетину в'язей розташований еліптичний або круглий демпфер зі сталеві стрічки, який прикріплений до вершин в'язів болтовими з'єднаннями, а в зазорах між спареними в'язями знаходиться демпфер зі ста-

левої стрічки в формі синусоїди, прикріплений до в'язів болтовими з'єднаннями (рис. 6).

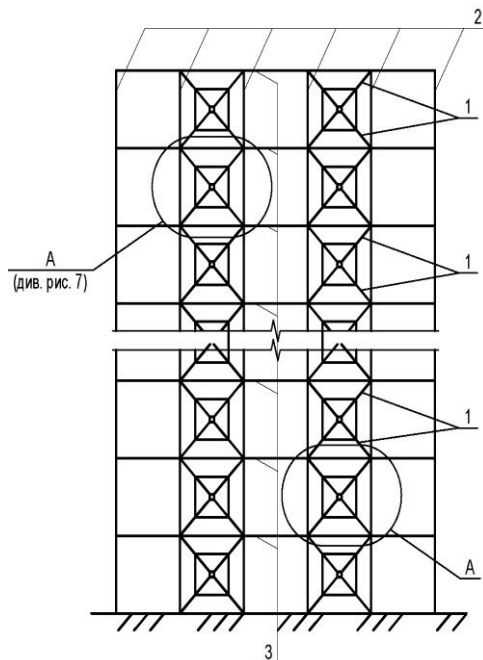


Рис. 6. Сейсмостійкий каркас висотної будівлі з енергопоглиначем:

- 1 – парні діагональні в'язі;
- 2 – колони каркасу будівлі;
- 3 – ригелі каркасу будівлі

В такому випадку, розсіювання сейсмічних коливань можна зобразити виразом:

$$W_c = W_k + W_b,$$

де:  $W_c$  – енергія від сейсмічних коливань, що впливає на будівлю;  $W_k$  – енергія, що розсіюється у напівжорстких (пластичних) вузлах каркасу;  $W_b$  – енергія, що розсіюється у в'язевих вузлах з енергопоглиначем.

Також, однією з особливостей запропонованої конструктивної схеми є те, що діагональні в'язі додатково розділені на дві частини додатковими спареними в'язями, що розташовуються паралельно ригелів і колон, в зазорі між якими також знаходяться демпфери у формі синусоїди зі сталеві стрічки, яка прикріплена до в'язів болтовими з'єднаннями (Тімченко, 2016).

Запропоновані технічні рішення ілюструються рисунками, де на рис. 6 схематично зображена запропонована конструктивна сема висотної будівлі, на рис. 7 – в'язевий вузол А з енергопоглиначем.

Енергопоглинач містить парні діагональні в'язі 1, які розміщені в комірни рами, утвореної

колонами 2 і ригелями 3. В'язі жорстко прикріплені до колон 2 та ригелів 3 з утворенням діагонально розташованих зазорів 4 між в'язями і зазором 5 між їх вільними вершинами.

Діагональні в'язі 1 додатково розділені на дві частини додатковою парою в'язей 6 з зазором між ними 10, розташованими паралельно колонам 2 та ригелям 3.

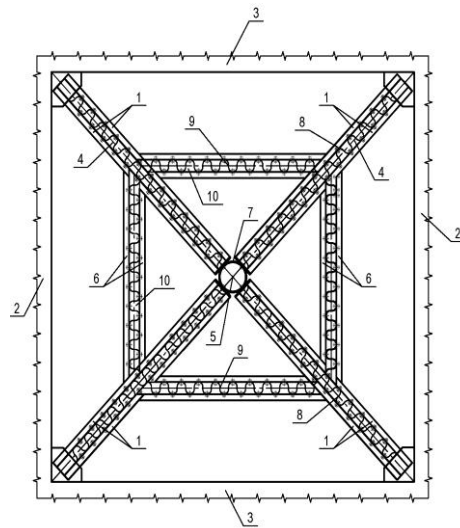


Рис. 7. В'язевий вузол А з енергопоглиначем:

- 1 – парні діагональні в'язі; 2 – колони каркасу будівлі; 3 – ригелі каркасу будівлі; 4 – діагонально розташовані зазори між парними в'язями; 5 – зазор між в'язями для розміщення круглого демпфера; 6 – додаткові пара в'язей, розміщених паралельно колонам та ригелям; 7 – круглий демпфер з листової сталі, розташований в зазорі між в'язями; 8 – демпфер із листової сталі у формі синусоїди розміщений між діагональним в'язями; 9 – демпфер із листової сталі у формі синусоїди розміщений між діагональним в'язями; 10 – зазор між додатковими в'язями для розміщення демпфера

Енергопоглинач обладнаний демпферами 7, 8, 9 у вигляді сталеві стрічки. Демпфер 7 має круглу форму і знаходиться на перетині зазорів 5 та 10. Демпфер 8 розташований в зазорах 4, демпфери 9 – в зазорах 10. Демпфери 8, 9 мають форму синусоїди. Демпфери 7, 8, 9 прикріплені до в'язей за допомогою болтів. Робота елементів в'язевих вузлів реалізується наступним чином.

При сейсмічній дії справа наліво на каркас висотної будівлі і зокрема раму, що обмежується колонами 2 та ригелями 3, крайні ліві в'язі 1 та додаткові в'язі 6 будуть працювати на стиск, лівий верхній і нижній демпфери 8, які знаходяться в зазорах 4, демпфери 9, які знаходяться в зазорах 10, зазнаватимуть зусилля стиснення. Демпфер 7, який знаходиться в зазорі 5, працює

на стиск і вигин, праві верхні і нижні демпфери 8 та 9 будуть стискатися, в'язі 1 та 6, розташовані справа працюватимуть на вигин, демпфери 9, розташовані в зазорах 10, також будуть стискатися. При цьому частини в'язей 1, які з'єднані з центральним демпфером 7 будуть відчувати нерівномірне обтиснення з усіх боків.

При дії сейсмічного навантаження зліва направо робота елементів змінюється на протилежну.

При асиметричному сейсмічному навантаженні додаткові демпфери 9 будуть перерозподіляти зусилля між усіма вузлами конструкції, направляючи частину навантаження на жорсткі вузли з'єднання ригелів 3 і колон 2, тим самим зменшуючи пікові значення зусиль в елементах. Внаслідок цього ефекту система в'язей з енергопоглиначами підвищить стійкість каркасу висотної будівлі при сейсмічних впливах. Це створить ефект гасіння амплітуди сейсмічних коливань у в'язевих вузлах, що зменшить надлишкові моменти у вузлах з'єднання колон та ригелів.

### Результати

Конструктивна схема висотної будівлі з використанням напівжорстких вузлів з'єднання елементів каркасу та додатково розміщених у комірках каркасу в'язей з енергопоглиначем дозволить раціонально здійснити гасіння сейсмічних коливань по всій висоті будівлі, від основи до покриття та створить умови для розсіювання сейсмічних коливань у напівжорстких вузлах каркасу та в'язевих демпферах.

У порівнянні зі звичайною рамно-в'язевою конструктивною схемою, запропонована рамно-в'язева конструктивна схема висотної будівлі з напівжорстким з'єднанням колон та ригелів та енергопоглиначами у в'язевих вузлах дозволить зменшити пікові значення зусиль у вузлах рам висотної будівлі та підвищить сейсмостійкість висотної будівлі без застосування додаткових сейсмогасителів.

### Наукова новизна і практична значимість

Було розглянуті основні конструктивні схеми висотних будівель, з виокремленням рамно-в'язевої конструктивної схеми та описом її переваг і недоліків. Запропонований варіант підвищення сейсмостійкості каркасу при даній конструктивній схемі за допомогою енергопоглиначів. Було проведено детальний опис про-

гнозованої поведінки конструктивної схеми будівлі та розглянуто принцип роботи запропонованого енергопоглиначача на основі аналізу фізико-механічних процесів у його елементах та суміжних з ним конструктивних елементів каркасу будівлі.

Технічний результат запропонованого варіанту сейсмостійкого каркасу полягає у підвищенні сейсмостійкості та надійності рамно-в'язевих висотних будівель за допомогою влаштування в'язевих вузлів з енергопоглиначем, без використання додаткових окремих сейсмогасителів.

### Висновки

Напівжорсткі з'єднання вертикальних та горизонтальних несучих елементів дозволяє підвищити сейсмостійкість висотної будівлі, знижуючи деформації у вузлах, спричинених сейсмічними коливаннями.

Використання запропонованого енергопоглиначача у в'язевих вузлах рамно-в'язевої схеми висотної будівлі зменшить передачу навантажень від сейсмічних коливань на вузли рам висотної будівлі завдяки частковому розсіюванню та зменшенню амплітуди цих коливань у в'язевих вузлах.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Prasanth, S., & Ghosh, G. (2023). Effect of Seismicity on the Seismic Resilience of a R.C. Building. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*, 93, 147-161. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40010-022-00803-x>
- Rezaei, A., Ezreg, A., Aljoat, M., & Milad, A. (2016). Rigid Frame systems. *CIU Uluslararası Kirbis Universitesi*, CVL548, 6-20.
- Sharma, V., Bhandari, M., Shrimali, M. K., Bharti, S. D., & Datta, T. K. (2022). Numerical study of hybrid steel frames under far-field earthquakes. *12th Structural Engineering Convention-An International Event*, 781-787. DOI: <https://doi.org/10.38208/acp.v1.582>
- Sharma, V., Shrimali, M. K., Bharti, S. D., & Datta, T. K. (2018). Behavior of semi-rigid connected steel frames under seismic excitations. *16-th Symposium on Earthquake Engineering. Indian Institute of Technology*, 84, 1-10.
- Sharma, V., Shrimali, M. K., Bharti, S. D., & Datta, T. K. (2019). Seismic energy dissipation in semi-rigid connected steel frames. *16th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures Proceedings*, 705-717.
- Sharma, V., Shrimali, M. K., Bharti, S. D., & Datta, T.

- K. (2020). Behavior of semi-rigid steel frames under near- and far-field earthquakes. *Steel and Composite Structures*, 34(5), 625-641. DOI: <https://doi.org/10.12989/scs.2020.34.5.625>
- Sharma, V., Shrimali, M. K., Bharti, S. D., & Datta, T. K. (2020). Evaluation of responses of semi-rigid frames at target displacements predicted by the non-linear static analysis. *Steel and Composite Structures*, 34(4), 399-415. DOI: <https://doi.org/10.12989/scs.2020.36.4.399>
- Sharma, V., Shrimali, M. K., Bharti, S. D., & Datta, T. K. (2020). Evaluation of responses of semi-rigid frames at target displacements predicted by the non-linear static analysis. *Steel and Composite Structures*, 36, 4, 399-415. DOI: <https://doi.org/10.12989/scs.2020.36.4.399>
- Wood, A. (2012). High-rise buildings. *ArcelorMittal EU brochure*, 56-57.
- Банніков, Д. О., & Гезенцвей, Ю. І. (2023). Оцінка якості проектування конструктивних рішень сталевих будівель і споруд. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 23, 30-36. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2023/281076>
- Белаш, Т. А., & Тюльменев, Т. Р. (2009). Демпфери сухого трення в системі сейсмозащити висотних зданій. *Будівельні конструкції*, 69, 449-452.
- Гетун, Г., Колякова, В., Безклубенко, І., Баліна О., & Мельник В. (2019). Аналіз специфічних особливостей проектування висотних будівель у сейсмічних районах. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, 4, 39-46.
- Іванова, Г. П., Жабчик, К. С., Хозяйкіна, Н. В., & Григор'єв, О. Є. (2023). Проблема прогнозування живучості стрижневих конструкцій. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 23, 95-101. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2023/281166>
- Патент 93129 Україна, МПК (2013). Е 04 Н 9/02. *Енергопоглинач*. Тімченко, Р. О., Крішко, Д. А., Попов, С. О., Богатинський, А. В., & Кравченко, М. О. (Україна) № u 2014 01294; заявник і власник патенту Криворізький національний університет; Заявл. 10.02.2014; опубл. 25.09.2014, Бюл. 18, 7.
- Тімченко, Р. О., Крішко, Д. А., & Казнадій, Р. В. (2017). Конструктивні методи забезпечення сейсмостійкості будівель. *Міжнародна науково-технічна конференція «Розвиток промисловості та суспільства»*, 182.
- Тімченко, Р. О., Крішко, Д. А., Попов, С. О., Настич, О. Б., & Хоруженко, І. В. (2016). Конструктивне рішення енергопоглинача для каркасних будівель та споруд. *Містобудування та територіальне планування*, 59, 432-436.

R. O. TIMCHENKO<sup>1\*</sup>, D. A. KRISHKO<sup>2</sup>, V. O. BYKHNO<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Department of "Industrial, Civil and Urban Construction", Kryvyi Rih National University, St. 11 Vitaly Matusevicha St., Kryvyi Rih, 50027, Ukraine, tel. +38 (097) 295 83 53, e-mail radomirtimchenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-0684-7013

<sup>2</sup>Department of "Industrial, Civil and Urban Construction", Kryvyi Rih National University, St. 11 Vitaly Matusevicha St., Kryvyi Rih, 50027, Ukraine, tel. +38 (067) 709 17 74, e-mail dak.sf.amb@gmail.com, ORCID 0000-0001-5853-8581

<sup>3</sup>Department of "Industrial, Civil and Urban Construction", Kryvyi Rih National University, St. 11 Vitaly Matusevicha St., Kryvyi Rih, 50027, Ukraine, tel. +38 (067) 347 56 76, e-mail valeron1206@gmail.com, ORCID 0009-0003-7355-0521

## EARTHQUAKE-RESISTANT FRAMEWORK OF A HIGH-RISE BUILDING

**Purpose.** The purpose of this work is to consider the option of increasing the seismic resistance of the frame of a high-rise building by using an energy absorber in the tie nodes of the frame-tie scheme, which will reduce the transfer of dynamic loads from seismic vibrations to the frame nodes due to partial dispersion and reduction of the amplitude of these vibrations in "elder nodes". **Methodology.** Review of the main existing structural schemes of high-rise buildings and analysis of the advantages and disadvantages of the frame-elder scheme of a high-rise building, analysis of the effects of seismic vibrations on the nodes of the structural scheme of a high-rise building. Presentation of an option to increase the seismic resistance of the frame of a high-rise building by adding plastic nodes to the frame and using an energy absorber in the elm nodes of the frame-elm scheme, which will reduce the transfer of dynamic loads from seismic vibrations to the frame nodes due to partial dispersion and reduction of the amplitude of these vibrations in "elder nodes". **Findings.** Based on the results of the analysis, a method of increasing the seismic resistance of the frame of a high-rise building by using new structural solutions is proposed, which would reduce the seismic impact on the frame nodes. On the basis of the problem, a combined solution is presented: the use of plastic nodes in the joints of columns and crossbars of the frame to reduce moments in vertical load-bearing elements, a constructive model of an energy absorber for additional damping of vibrations along the height of the building is proposed, and the principle of its operation under the influence of seismic vibrations is considered; the structural elements of the energy absorber in the elm nodes and their interaction with each other are described in detail. **Originality.**

**ality.** The analysis of the existing structural schemes of high-rise buildings was performed. The variant of the earthquake-resistant frame of a high-rise building of frame-elm structural scheme with an energy absorber is considered, its design solution and the principle of its operation are described in detail. **Practical value.** The technical result of the proposed version of the earthquake-resistant frame consists in increasing the seismic resistance and reliability of frame-elm high-rise buildings using the arrangement of elm nodes with an energy absorber, without the use of additional separate earthquake absorbers.

*Keywords:* high-rise building; structural scheme; elm, energy absorber; damper; seismic resistance

## REFERENCES

- Prasanth, S., & Ghosh, G. (2023). Effect of Seismicity on the Seismic Resilience of a R.C. Building. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*, 93, 147-161. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40010-022-00803-x> (in English)
- Rezaei, A., Ezreg, A., Aljoat, M., & Milad, A. (2016). Rigid Frame systems. CIU Uluslararası Kirbis Universitesi, CVL548, 6-20 (in English)
- Sharma, V., Bhandari, M., Shrimali, M. K., Bharti, S. D., & Datta, T. K. (2022). Numerical study of hybrid steel frames under far-field earthquakes. *12th Structural Engineering Convention-An International Event*, 781-787. DOI: <https://doi.org/10.38208/acp.v1.582> (in English)
- Sharma, V., Shrimali, M. K., Bharti, S. D., & Datta, T. K. (2018). Behavior of semi-rigid connected steel frames under seismic excitations. *16-th Symposium on Earthquake Engineering. Indian Institute of Technology*, 84, 1-10. (in English)
- Sharma, V., Shrimali, M. K., Bharti, S. D., & Datta, T. K. (2019). Seismic energy dissipation in semi-rigid connected steel frames. *16th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures Proceedings*, 705-717. (in English)
- Sharma, V., Shrimali, M. K., Bharti, S. D., & Datta, T. K. (2020). Behavior of semi-rigid steel frames under near- and far-field earthquakes. *Steel and Composite Structures*, 34(5), 625-641. DOI: <https://doi.org/10.12989/scs.2020.34.5.625> (in English)
- Sharma, V., Shrimali, M. K., Bharti, S. D., & Datta, T. K. (2020). Evaluation of responses of semi-rigid frames at target displacements predicted by the nonlinear static analysis. *Steel and Composite Structures*, 34(4), 399-415. DOI: <https://doi.org/10.12989/scs.2020.36.4.399> (in English)
- Sharma, V., Shrimali, M. K., Bharti, S. D., & Datta, T. K. (2020). Evaluation of responses of semi-rigid frames at target displacements predicted by the nonlinear static analysis. *Steel and Composite Structures*, 36, 4, 399-415. DOI: <https://doi.org/10.12989/scs.2020.36.4.399> (in English)
- Wood, A. (2012) High-rise buildings. *ArcelorMittal EU brochure*, 56-57. (in English)
- Bannikov, D. O., & Hezentsvei, Yu. I. (2023). Otsinka yakosti proiektuvannya konstruktyvnykh rishen stalevykh budivel i sporud. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 23, 30-36. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2023/281076> (in Ukrainian)
- Belash, T. A., & Tyulmenev, T. R. (2009). Dempferyi suhogo treniya v sisteme seysmozaschityi vyisotnykh zdaniy. *Budivelni konstruktsii*, 69. 449-452. (in Russian)
- Hetun, H., Koliakova, V., Bezklubenko, I., Balina O., & Melnyk V. (2019). Analiz spetsyfichnykh osoblyvosti proektuvannya vysotnykh budivel u seismichnykh raionakh. *Budivelni konstruktsii. Teoriia i praktyka*, 4, 39-46. (in Ukrainian)
- Ivanova, H. P., Zhabchuk, K. S., Khoziaikina, N. V., & Hryhoriev, O. Ye. (2023). Problema prohnozuvannya zhyvuchosti stryzhnevnykh konstruktsii. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 23, 95-101. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2023/281166> (in Ukrainian)
- Patent 93129 Ukraina, МПК (2013). E 04 N 9/02. *Enerhopohlynach*. Timchenko, R. O., Krishko, D. A., Popov, S. O., Bohatynskyi, A. V., & Kravchenko, M. O. (Ukraina) № u 2014 01294; zaiavnyk i vlasnyk patentu Kryvorizkyi natsionalnyi universytet; Zaiavl. 10.02.2014; opubl. 25.09.2014, Biul. 18, 7. (in Ukrainian)
- Timchenko, R. O., Krishko, D. A., & Kaznadii, R. V (2017). Konstruktyvni metody zabezpechennia seismostiikosti budivel. *Mizhnarodna naukovo-tekhnichnoi konferentsiia «Rozvytok promyslovosti ta suspilstva»*, 182. (in Ukrainian)
- Timchenko, R. O., Krishko, D. A., Popov, S. O., Nastych, O. B., & Khoruzhenko, I. V. (2016). Konstruktyvne rishennia enerhopohlynacha dlia karkasnykh budivel ta sporud. *Mistobuduvannya ta terytorialne planuvannya*, 59, 432-436. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 16.10.2024.

Прийнята до друку 04.11.2024.