

УДК 69.022.32:699.841:624.042.7

ОЦІНЮВАННЯ СЕЙСМОСТІЙКОСТІ ТА ДИНАМІЧНОЇ МІЦНОСТІ НАВІСНИХ ВЕНТИЛЬОВАНИХ ФАСАДІВ ІЗ КАМ'ЯНИМ ОБЛИЦЮВАННЯМ

Кандидати техн. наук О. А. Дудін, О. В. Лобяк, А. С. Зверєва,
асп. В. В. Троцько

SEISMIC RESISTANCE AND DYNAMIC STRENGTH EVALUATION OF NATURAL STONE VENTILATED FACADE SYSTEMS

PhD (Tech.) O. Dudin, PhD (Tech.) Lobiak O.V., PhD (Tech.) A. Zvierieva,
postgraduate student V. Trotsko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.216.2026.362540>



Анотація. Стаття присвячена дослідженню сейсмостійкості навісних вентиляованих фасадів типів «KMD VF» і «АКАМ» із облицюванням плитами Vratza. Методологія поєднує натурні випробування на віброплатформі та чисельне моделювання в ПК Ліра-САПР (похибка до 9%). Встановлено, що система «KMD VF» зберігає 35% запасу міцності за дев'ятибального сейсмічного впливу. Для системи «АКАМ» виявлено критичну залежність надійності від кроку кронштейнів: крок 1 м забезпечує стійкість, тоді як крок 3 м призводить до руйнування кріплень. Доведено, що конструкції навісних вентиляованих фасадів здатні розсіювати енергію сейсмічного поштовху. Сформовано практичні рекомендації щодо обмеження вертикального кроку кріплень для висотного будівництва в сейсмоактивних зонах.

Ключові слова: навісні вентиляовані фасади, сейсмостійкість, динамічні впливи, вібраційні випробування, метод скінченних елементів, Ліра-САПР, напружено-деформований стан, конструкційна безпека.

Abstract. The article investigates the pressing issue of ensuring the seismic resistance of curtain wall ventilated facades (CWVF) in the seismically active regions of Ukraine. The primary objective of the study is to evaluate the dynamic strength of non-structural building elements to prevent economic losses and threats to human life. The objects of detailed analysis include the «KMD VF» and «АКАМ» facade systems equipped with massive Vratza stone cladding. The research is based on a comprehensive approach that combines full-scale experiments and theoretical calculations. The experimental phase involved testing fragments of facade structures on a specialized vibration platform. The LIRA-SAPR software package was utilized for numerical modeling of the stress-strain state of the systems. The authors applied the finite element method to accurately reproduce the behavior of the fastening units under load. Comparative analysis showed high convergence of results, with a margin of error not exceeding nine percent. It was established that the «KMD VF» system demonstrates a thirty-five percent safety margin under a nine-point seismic impact. It was found that the reliability of the «АКАМ» system directly depends on the selected vertical pitch of the brackets. Calculations proved that a bracket pitch of one meter ensures the necessary stability of the structure during an earthquake. Conversely, increasing the pitch to three meters leads to critical deformations and the failure of the main connecting elements. An important conclusion was the confirmation of the

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

© Дудін О. А., Лобяк О. В., Зверєва А. С., Троцько В. В., 2026.

facade systems' ability to dissipate the energy of mechanical vibrations acting as dampers. Based on the data obtained, practical recommendations were formulated for designing high-rise objects in challenging seismic conditions. This work creates the necessary scientific foundation for increasing the operational safety of modern ventilated facades in domestic construction.

Keywords: *curtain wall ventilated facades, seismic resistance, dynamic impacts, vibration testing, finite element method, LIRA-SAPR, stress-strain state, structural safety.*

Вступ. Навісні вентилявані фасади є важливою складовою сучасної будівельної індустрії, відіграючи головну роль у забезпеченні енергоефективності, естетичної виразності та експлуатаційної довговічності об'єктів архітектури. Ці багатошарові системи, що складаються з несучого підконструкційного каркаса, термоізоляційного шару та зовнішнього захисно-декоративного екрана з обов'язковим повітряним прошарком, широко впроваджують як у новому будівництві, так і в процесах реновації та капітальної реконструкції існуючого фонду. Їхнє функціональне призначення полягає в оптимізації теплотехнічних показників зовнішніх огорожувальних конструкцій і надійному захисті будівель від агресивних атмосферних і техногенних впливів.

Зростання висотності забудови та розширення географії будівництва в сейсмоактивних регіонах України зумовлює необхідність посиленої уваги до динамічної стійкості всіх компонентів споруди, зокрема «неконструктивних елементів», до яких належать фасадні системи. Традиційна парадигма розглядала фасади як вторинні компоненти, що не впливають на загальну несучу здатність об'єкта. Проте сучасний науковий дискурс і аналіз наслідків стихійних лих переконливо доводять, що пошкодження саме неконструктивних елементів під час землетрусів є головним чинником масштабних економічних втрат. Такі руйнування створюють безпосередню загрозу життю людей, ускладнюють евакуацію та призводять до втрати функціональності життєво важливих будівель [1, 2].

Ігнорування вимог щодо сейсмічної стійкості фасадів може спричинити «каскадний ефект», коли локальна втрата

цілісності одного елемента ініціює масштабне руйнування системи. Отже, актуальність цього дослідження виходить за межі суто інженерного завдання з підвищення надійності окремої конструкції; вона полягає в гарантуванні комплексної безпеки і стійкості міського середовища, що має стратегічне соціально-економічне значення для сейсмонебезпечних регіонів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Упродовж останніх років спостерігають суттєве зростання наукового інтересу до динамічної та сейсмічної стійкості фасадних систем. Сучасні дослідження в цій галузі поєднують масштабні експериментальні випробування зі складним чисельним моделюванням, що зумовлено дедалі суворішими вимогами щодо безпеки та необхідністю відповідності актуальним будівельним нормам у сейсмоактивних регіонах.

Випробування на вібростендах (shake-table tests) залишаються одним із найбільш достовірних методів оцінювання сейсмічної реакції неконструктивних елементів. Зокрема, дослідження Samali та Abtahi (2016) [3] довели, що фасадні системи здатні функціонувати як демпфери, розсіюючи енергію сейсмічного впливу та знижуючи вібрації основної конструкції. Автори продемонстрували, що оптимізація параметрів жорсткості та демпфування кронштейнів, які з'єднують оболонки фасаду, допомагає ефективно нівелювати значну частину енергії землетрусу [3].

Універсальність методології вібростенових випробувань підтверджена також роботами Di Sarno (2018) [4], де на прикладі лікарняних шаф вивчали такі критичні стани, як розгойдування та перекидання неконструктивних

компонентів. Аналогічні підходи застосовано для оцінювання сейсмічної стійкості гіпсокартонних перегородок, де було зафіксовано їхню стабільну поведінку як у площині, так і поза нею [5]. Така тенденція до експериментальної валідації підкреслює складність взаємодії фасадів з остовом будівлі та необхідність верифікації теоретичних моделей. У межах цього дослідження наявність експериментальних даних дала змогу досягти високої точності розрахункових моделей із похибкою, що не перевищує 9 %, що свідчить про високу достовірність отриманих результатів.

Паралельно з експериментами широкого розповсюдження набув метод скінченних елементів (МСЕ). Samali та Abtahi (2016) [3] за допомогою тривимірного моделювання виявили, що конструктивні недосконалості вузлів з'єднання можуть спричиняти критичні напруження за дії сейсмічних навантажень. Дослідження скляних фасадів (PFGFS) також демонструють ефективність поєднання локального аналізу з'єднань (3D FEM в ABAQUS) із глобальним системним моделюванням (SAP2000) [6]. Такий комплексний підхід дає змогу пропонувати інноваційні вузли з низьким рівнем пошкоджень, що підвищують загальну несучу здатність конструкцій [6].

Сучасна наукова практика доводить, що синергія чисельного моделювання (наприклад у ПК «Ліра-САПР» або «TRNSYS» [8]) і натурних випробувань є найбільш надійним інструментом для аналізу складних систем, таких як вентилязовані фасади [9–11]. Це особливо актуально з огляду на те, що пошкодження неконструктивних елементів є головним чинником економічних втрат і ризиків для життя під час землетрусів [1, 2]. Міжнародні ініціативи, зокрема проєкт ISCREANE (2023–2024) [2], сфокусовані на розробленні інструментів для сейсмічного оцінювання фасадів критичної інфраструктури (шкіл, лікарень), впроваджуючи методології, засновані на переміщеннях.

Попри значний прогрес, питання стійкості специфічних навісних систем в умовах українського нормативного поля залишаються недостатньо вивченими. Більшість існуючих праць сфокусовані на загальних принципах або окремих типах облицювання, як-от скло [6] чи гіпсокартон [5]. Проте комплексне оцінювання систем «KMD VF» і «AKAM» з оздобленням масивною плитою Vratza за дії вібраційних навантажень потребує індивідуального підходу. Ця робота заповнює прогалини, досліджуючи взаємодію елементів кріплення (алюмінієвий сплав АД31Т1, заклепки, дюбелі) і специфіку їхньої поведінки відповідно до вимог ДБН В.1.1-12:2006 [17]. Це забезпечує наукове обґрунтування для практичного застосування таких фасадних систем у сейсмоактивних регіонах України.

Метою дослідження є визначення стійкості системи навісних вентилязованих фасадів типу «KMD VF» і «AKAM» з оздобленням фасадною плитою Vratza (із сіткою та без неї) за дії вібраційних і динамічних впливів. Для визначення можливості застосування зазначеної системи в сейсмоактивних регіонах України виконали розрахункові дослідження напружено-деформованого стану елементів фасадної системи та експериментальні лабораторні випробування її фрагменту.

Завдання дослідження:

– розробити методику експерименту і провести динамічні дослідження фрагментів вентилязованих фасадів на віброплатформі;

– провести чисельні дослідження фасадної системи в середовищі ПК «Ліра-САПР» і порівняти результати з даними експерименту;

– виконати розрахунки фасадної системи на сеймонавантаження для реальних умов використання, підготувати конструктивні рекомендації для підвищення експлуатаційної надійності.

Методику досліджень та оцінювання несучої здатності в умовах

сеймонавантаження прийняти відповідно до джерел [12-17].

Матеріали та методика дослідження. Навісні вентилявані фасади призначені для утеплення та облицювання зовнішніх огорожувальних конструкцій, будівництва нових, реконструкції та капітального ремонту існуючих будівель і споруд.

Системи «KMD VF» є багатошаровими конструкціями, що включають несучий металевий (з алюмінієвого сплаву) каркас (систему кріплення), прикріплений до основи (несучих конструкцій зовнішньої стіни), шар утеплювача і фасадний облицювальний шар, прикріплений до елементів несучого каркаса.

Система кріплення «KMD VF» складається з деталей і збірних одиниць. За функціональним призначенням можна поділити на основні деталі (кронштейни, стійки несучі), облицювальні елементи (заклепки, профілі), другорядні деталі (терморозриви, допоміжні профілі), вироби для закріплення кронштейнів, утеплювача (анкери, фасадні дюбелі), деталі для закріплення підсистеми (болти, гайки, шайби, гвинти, заклепки витяжні, саморізи).

Фасадна система типу «KMD VF» з оздобленням фасадною плиткою Vratza 1000x1000x30 складається з кронштейнів 210L і 210S, кутиків 35x60, прогонів із профілю тримача каменю DK894, терморозривів TE1(TE3), болтів M10x50, заклепок 4.8x12 і 4.8x8, плиток Vratza 1000x1000x30 і 1000x330x30 (із сіткою та без неї).

Базові деталі і несучі елементи системи кріплення виготовлені з алюмінієвого сплаву АД31Т1 ДСТУ Б.В.2.6-30: 2018 (6063).

Системи «АКАМ» є багатошаровими конструкціями, що включають сталевий несучий каркас, прикріплений до основи, шар утеплювача і фасадний облицювальний шар, прикріплений до елементів несучого каркаса.

Система кріплення «АКАМ» складається з деталей і збірних одиниць. За функціональним призначенням складається з

основних деталей (кронштейни, профілі), елементів кріплення фасадної плитки (клямери, шпильки, втулки), другорядних деталей (терморозриви, допоміжні профілі), виробів для закріплення кронштейнів, утеплювача (анкери, фасадні дюбелі), деталей для закріплення системи (болти, гайки, шайби, гвинти, саморізи).

Фасадна система типу «АКАМ» з оздобленням фасадною плиткою Vratza складається з металевих кронштейнів L185x120x50 товщиною 4 мм, металевих вертикальних гнутих профілів U40x40x3, металевих елементів кріплення фасадної плитки (клямерів) із болтом Ø10 довжиною 70 мм і проушиною під шпильку Ø8, болтів M10x50, плиток Vratza 1000x1000x30 (1000x500x30, 1000x330x30 – для місцевого використання, із сіткою та без неї).

Досліджуючи та оцінюючи несучу здатність в умовах сеймонавантаження, для зазначених систем застосовано чисельне моделювання з використанням методу скінченних елементів. Додатково проведено натурне випробування основних вузлів кріплення та елементів системи фрагменту фасадної системи, закріпленої на вібромайданчику, для верифікації розрахункових моделей і уточнення параметрів міцності матеріалів в умовах динамічних навантажень.

Результати дослідження.

Експериментальні випробування фасадної системи виконано на віброплатформі для зразків-фрагментів систем типів «KMD VF», «АКАМ» (рис. 1).

Параметри вібрації – акселерограма вібрації (рис. 2, 3), вібропереміщення несучих вертикальних і горизонтальних елементів фасадної системи від штучного збуджувача коливань – визначали за допомогою віброаналізатора КонТест 7МС911.

Для визначення відносних деформацій і напружень в поєднанні з віброаналізатором використовували універсальну тензометричну станцію. Відносні деформації фіксували в небезпечних перерізах кронштейнів і

сталевих профілях (у місцях кріплення і в серединах прогонів).

Результати випробувань наведено в табл. 1, 2.

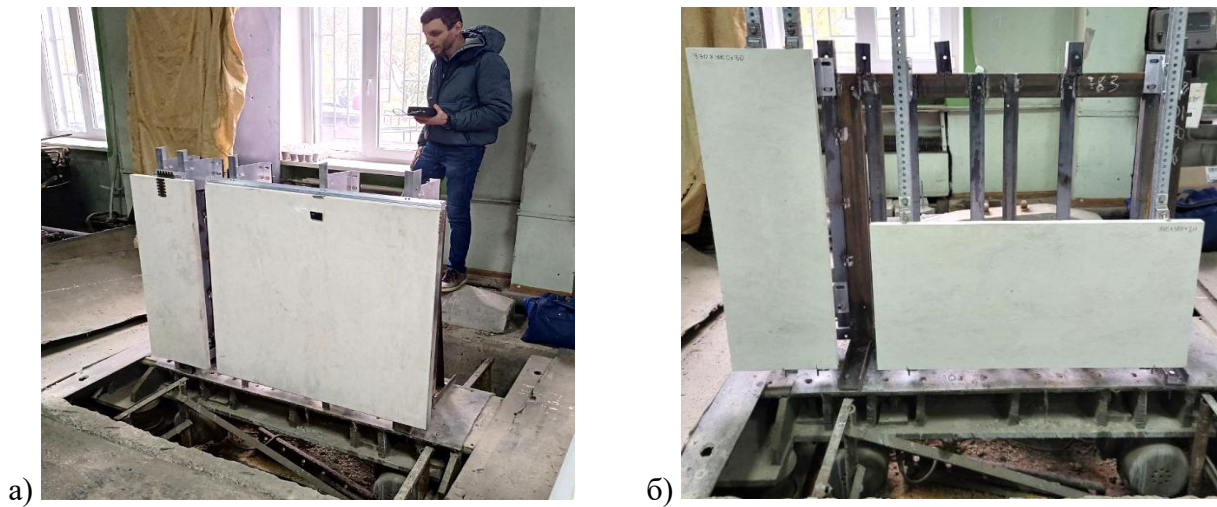


Рис. 1. Випробування фрагментів фасадної системи:
а – система типу «KMD VF»; б – система типу «АКАМ»

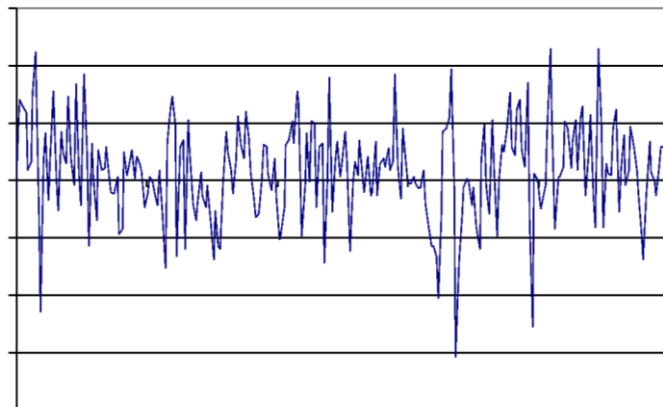


Рис. 2. Фрагмент вимірювання PointCount - DLY

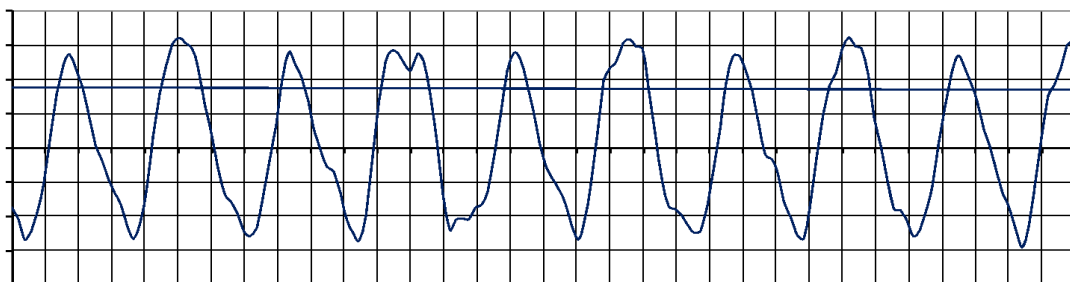


Рис. 3. Фрагмент акселерограми вібрації віброплатформи

Таблиця 1

Результати досліджень зразка-фрагменту фасадної системи «KMD VF»

Номер	Досліджуваний параметр	Одиниця вимірювання	Значення		Похибка, %
			Випробування	Розрахунок	
1	Вертикальне переміщення плитки 1x1 м	мм	5.4	5.07	6.1
2	Вертикальне переміщення плитки 1x0.33 м	мм	2.7	2.53	6.3
3	Горизонтальні переміщення плитки 1x1 м	мм	0.69	0.64	7.2
4	Горизонтальні переміщення плитки 1x0.33 м	мм	0.44	0.41	6.8
5	Напруження в кронштейнах 210L	МПа	61	65.5	-7.4
6	Напруження в кронштейнах 210S	МПа	86	92.1	-7.1
7	Напруження в профілі DK894	МПа	102	108	-5.9

Таблиця 2

Результати досліджень зразка-фрагменту фасадної системи «АКАМ»

Номер	Напрямок переміщень	Одиниця вимірювання	Значення		Похибка, %
			Випробування	Розрахунок	
1	2	3	4	5	6
1. Плитка 1000x1000x30 мм					
1	Вертикальне переміщення	мм	2.55	2.35	7.8
2	Горизонтальне переміщення	мм	4.10	3.76	8.3
2. Плитка 1000x500x30 мм					
3	Вертикальне переміщення	мм	1.75	1.62	7.4
4	Горизонтальне переміщення	мм	1.76	1.65	6.3
3. Плитка 1000x330x30 мм					
5	Вертикальне переміщення	мм	0.90	0.86	4.4
6	Горизонтальне переміщення	мм	1.75	1.65	5.7
7	Максимальні напруження в кронштейнах L185x120x50	МПа	118	126	-6.8
8	Максимальні напруження в профілі U40x40x3	МПа	69	72.4	-4.9

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5	6
9	Максимальні напруження в кріпильних елементах (клямерах)	МПа	180	192	-6.7
10	Напруження в плитці (у місцях кріплення)	МПа	>10 (руйнування окремих з'єднань)	11.6	7.8

Для порівняння результатів виконано динамічні розрахунки фрагментів фасадних систем на акселерограму вібрації, проаналізовано напружено-деформований стан та перевірено можливості сходу плиток.

Фрагменти розрахункових моделей для одного пакета фасадної системи

зображено на рис 4, 6, 7. Результати розрахунків подано у вигляді полів напружень для найбільш небезпечної форми коливання. Еквівалентні напруження визначали за критерієм Губер-Хенкі-Мізеса (рис. 5, 8).

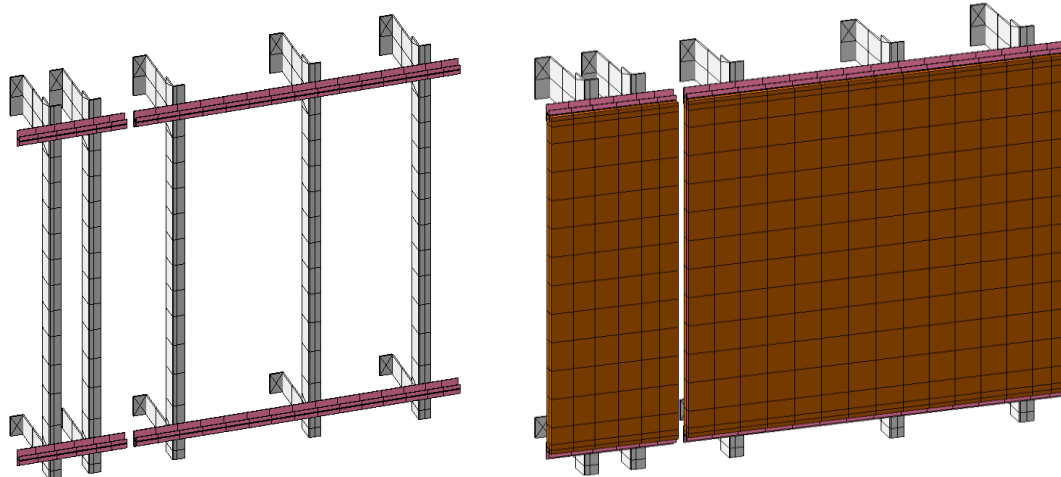


Рис. 4. Модель випробувального пакета системи типу «KMD VF»

Розрахункові моделі реалізують контактні задачі в з'єднаннях несуча конструкція-кронштейни, кронштейни-профіль, профіль-клямери, клямери-плитка (рис. 7). Реалізація контактних задач забезпечена скінченними елементами № 55 – спеціалізованими двовузловими стрижневими елементами, призначеними для моделювання пружних зв'язків між суміжними елементами.

Встановлено, що під час експериментальних випробувань підсистема

кріплення плитки зберігає цілісність, пластичних деформацій не встановлено, падіння плиток не відбувалося. Вузли сполучення системи кріплення зберігають надійність. Експериментально і розрахунково отримано руйнування окремих плиток у вузлах кріплення до системи кріплення (рис. 9) типу «АКАМ». Отримані вібропереміщення і напруження збігаються з результатами розрахунків (похибка не перевищує 9%), адекватність розрахункових моделей можна вважати досягнутою.

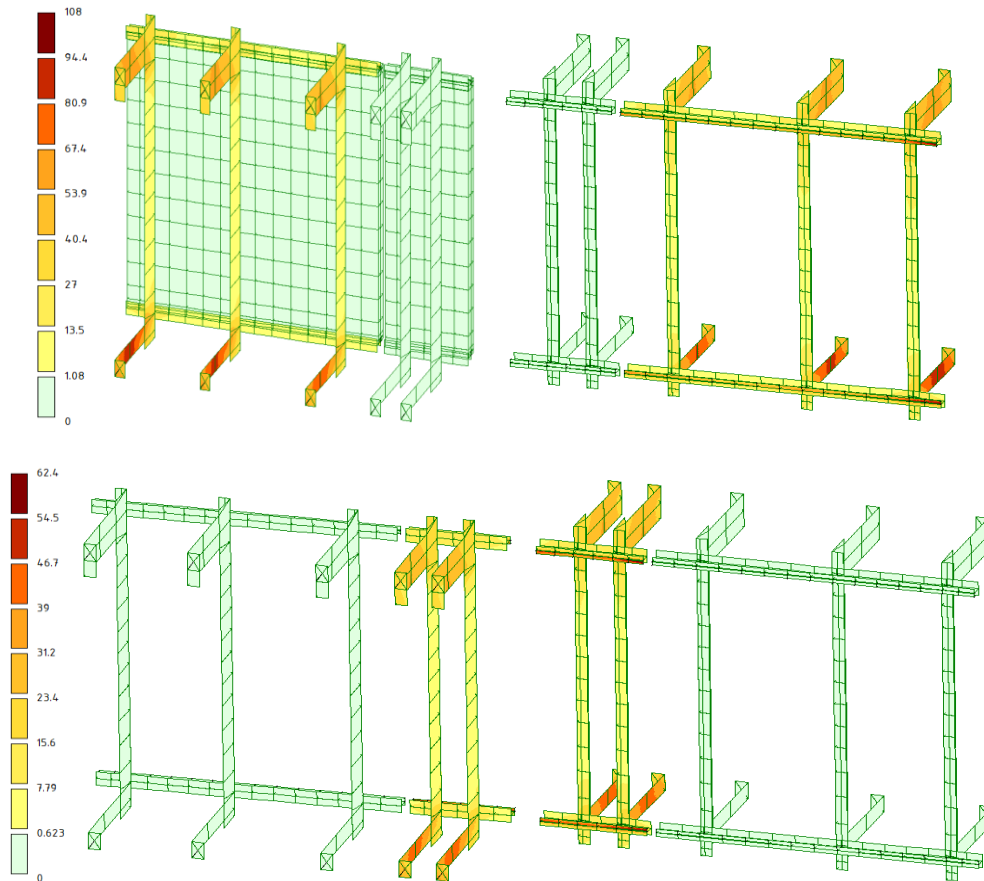


Рис. 5. Напруження в елементах кріплення системи «KMD VF», МПа

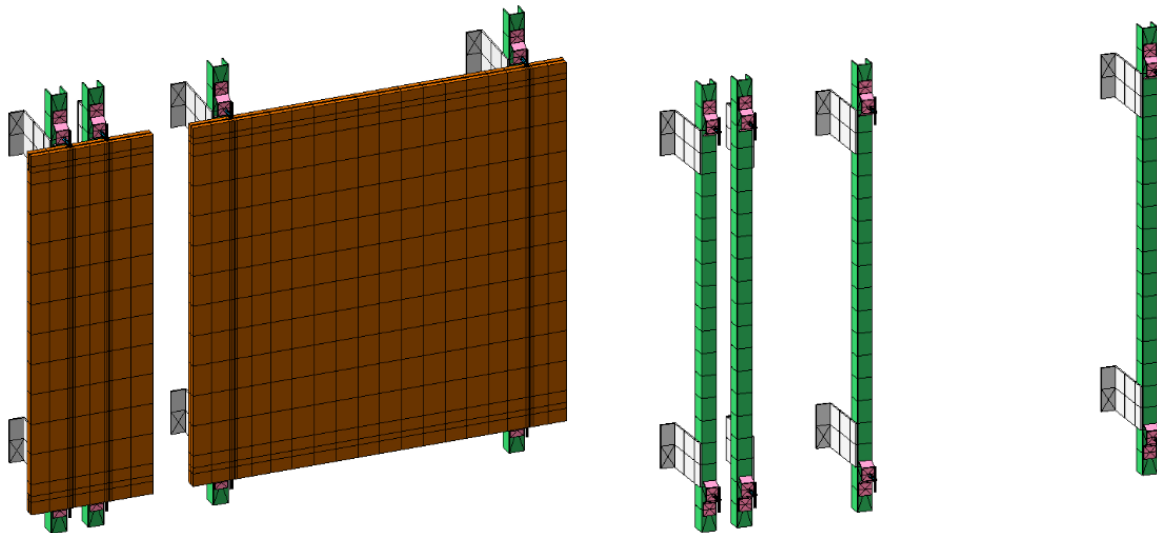


Рис. 6. Моделі зразків фасадної системи типу «АКАМ» (початок)

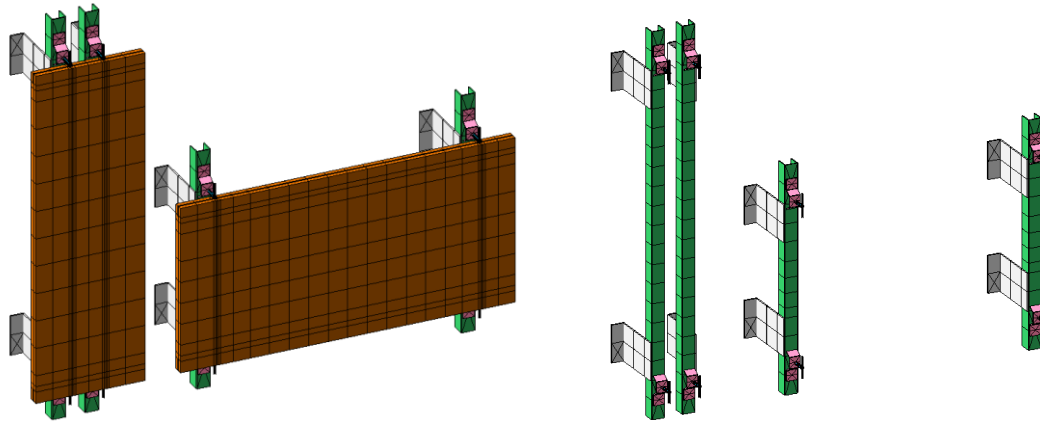


Рис. 6 (закінчення)

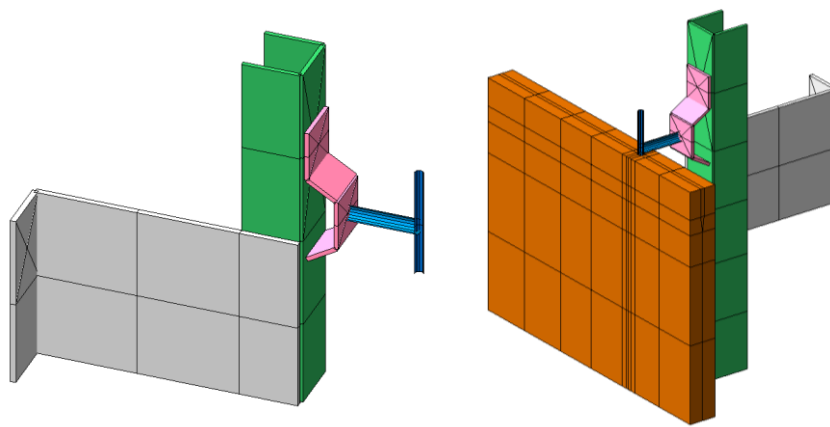


Рис. 7. Вузли сполучення елементів фасадної системи типу «АКАМ»

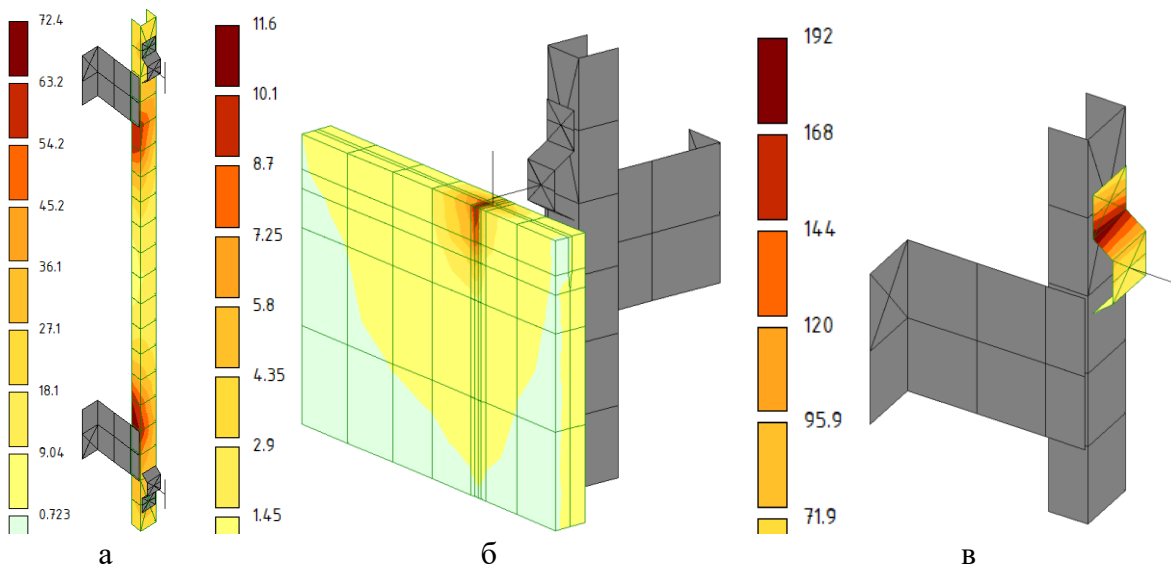


Рис. 8. Максимальні напруження в елементах фасадної системи типу «АКАМ», МПа:
а – у профілях каркаса; б – у вузлах з'єднання плитки з системою кріплення;
в – у клямерах системи кріплення



Рис. 9. Руїнація у вузлах кріплення за навантажень ~150 % сейсміки 9

Розрахунок фасадної системи на сеймонавантаження для реальних умов використання

Вихідні дані для розрахунку фасадної системи на сеймонавантаження:

- клас наслідків (відповідальності будівлі) – СС-3;
- тип споруди - житлові, громадські;
- вітрове навантаження – 550 Па;
- карта сейсмічного районування – ОСР-2004-С (1 %);
- категорія ґрунтів за сейсмічними властивостями – III;
- сейсмічність майданчика будівництва згідно з ОСР-2004-С (1 %) – 8;
- розрахункова сейсмічність згідно з табл. 1.1 ДБН В.1.1-12:2006 – 9;
- напрямок сеймонавантаження – X, Y або Z;
- висота умовної будівлі – 36 м.

Опис методики розрахунку

Розрахунок фасадної системи з урахуванням сейсмічних впливів виконано в середовищі ПК «Ліра-САПР» із використанням спектрального методу (модуль 36) відповідно до п. 2.3 ДБН В.1.1-12:2006.

Для визначення розрахункових значень горизонтальних сейсмічних навантажень на фасадну систему прийнято розрахункову схему у вигляді просторового

багатомасового пружно-деформованого консольного стрижня, жорстко закріпленого в основі, що несе зосереджені маси вагою Q_k і здійснює коливальний рух за одним із напрямків - x, y або z (рис. 10, а).

Розрахункову модель (рис. 10, б, 11) побудовано з використанням об'ємних скінченних елементів (СЕ) для моделювання умовної будівлі і плитки, СЕ оболонки – для кронштейнів і прогонів, а також спеціальних СЕ для моделювання зв'язків плитка-прогони, прогони-кронштейни, кронштейни-будівля.

Розрахункове значення горизонтального сейсмічного навантаження S_{ki} , прикладеного до точки k згідно з i-ю формою власних коливань системи визначено за формулою

$$S_{ki} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot S_{0ki}, \quad (1)$$

де k_1 – коефіцієнт, що враховує непружні деформації та локальні пошкодження елементів будівлі (табл. 2.3 ДБН В.1.1-12:2006) – 1.0 (пошкодження чи непружні деформації не допускають);

k_2 – коефіцієнт відповідальності споруди (табл. 2.4 ДБН В.1.1-12:2006) – 1.0 (житлові, громадські та виробничі будівлі);

k_3 – коефіцієнт етажності – 1.3 (10 поверхів);

S_{0ki} – горизонтальне сейсмічне навантаження за i -ю формою власних коливань споруди.

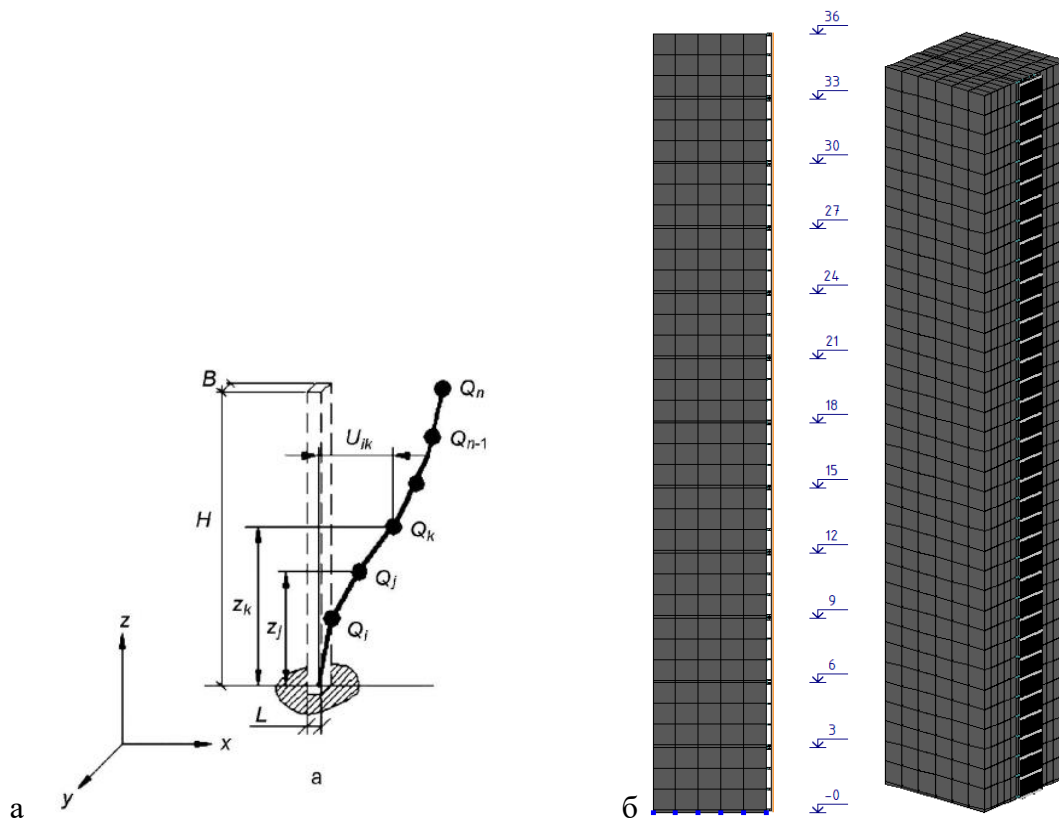


Рис. 10. Розрахункова схема спектрального методу

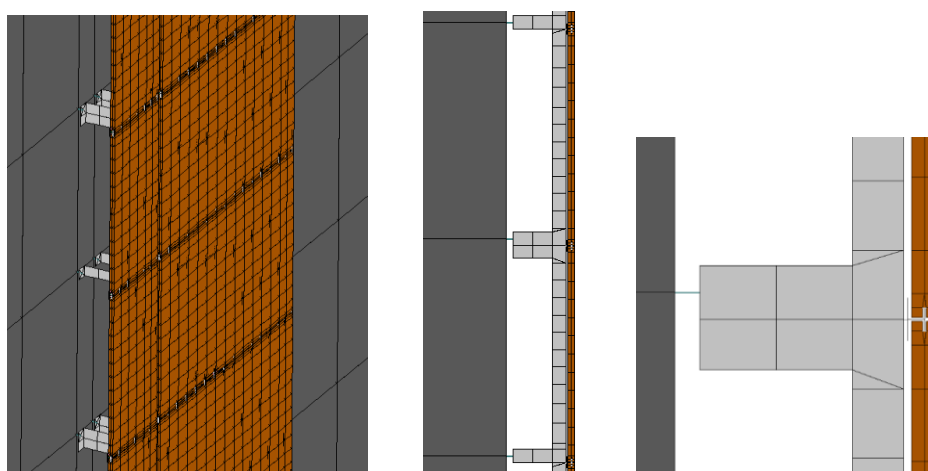


Рис. 11. Моделювання вузлів

Горизонтальне сейсмічне навантаження S_{0ki} за i -ю формою власних коливань споруди визначають за пружно-деформованою схемою системи за формулою

$$S_{0ki} = Q_k \cdot a_0 \cdot k_{ГР} \cdot \beta_i \cdot \eta_{ki}, \quad (2)$$

де Q_k – навантаження, що відповідає масі, визначеній програмою як зосереджену в точці k з урахуванням коефіцієнтів з табл. 3;

a_0 – відносне прискорення ґрунту (приймають 0,4);

$k_{ГР}$ – коефіцієнт, що враховує нелінійне деформування ґрунту – 0.7 (для категорія ґрунтів III і сейсмічності 9);

β_i – спектральний коефіцієнт динамічності, що відповідає i -й формі власних коливань споруди (визначають програмою);

η_{ki} – коефіцієнт, що залежить від форми власних коливань системи або споруди та від місця розташування навантаження (визначають програмою).

Таблиця 3

Розрахункові сполучення навантажень

Номер РСН	Коефіцієнт сполучення				
	Власна вага	Вітрове навантаження	Сейсміка в напрямку Y	Сейсміка в напрямку X	Сейсміка в напрямку Z
1	1.0	0	0	0	0
2	1.0	1.0	0	0	0
3	1.0	0	1.0	0	0
4	1.0	0	0	1.0	0
5	1.0	0	0	0	1.0
6	0.9	0.5	1.0	0	0
7	0.9	0.5	0	1.0	0
8	0.9	0.5	0	0	1.0

Результати розрахунків

Результати розрахунків подано у вигляді полів напружень для найбільш навантаженої ділянки фасадної системи. Оцінювали міцність за еквівалентними напруженнями, знайденими із залученням енергетичної теорії Губер-Хенкі-Мізеса (рис. 12-14). Зусилля по контактах плитка-прогони, прогони-кронштейни,

кронштейни-будівля приймають за відповідним спеціальним скінченим елементом моделі.

Зведені результати наведено в табл. 4-6. Показники несучої здатності подано як коефіцієнт, що вказує на ступінь вичерпання міцності. Вважають, що допущені значення коефіцієнта становить не більше 1.0 (або 100 % вичерпання).

Таблиця 4

Зведені результати розрахунків системи типу «KMD VF»

Номер	Показник несучої здатності	Розрахункове зусилля, кг	Напруження, МПа	Несуча здатність, кг	Розрахунковий опір, МПа	Коефіцієнт вичерпання
1	Зусилля відриву дюбеля з шурупом	36	-	150...500	-	0.24...0.10
2	Зусилля відриву заклепки	8.1	-	25...45	-	0.33...0.18
3	Зусилля відриву плитки від профілю прогонів	25	-	85	-	0.30
4	Напруження в кронштейнах	-	40.9	-	120	0.34
5	Напруження в профілі	-	66	-	120	0.55

Таблиця 5

Результати розрахунків системи «АКАМ» для вертикального кроку кронштейнів 1 м

Номер	Показник несучої здатності	Розрахункове зусилля, кг	Напруження, МПа	Несуча здатність, кг	Розрахунковий опір, МПа	Коефіцієнт вичерпання
1	Зусилля відриву дюбеля з шурупом	57.4	-	150...500	-	0.38...0.12
2	Максимальні напруження в кронштейнах	-	89.4	-	230	0.39
3	Максимальні напруження в профілі	-	79.5	-	230	0.35
4	Максимальні напруження в кріпильних елементах (клямерах)	-	129	-	230	0.56
5	Максимальні напруження в плитці в місцях кріплення	-	7.17	-	10	0.72

Таблиця 6

Результати розрахунків системи «АКАМ» для вертикального кроку кронштейнів 3 м

Номер	Показник несучої здатності	Розрахункове зусилля, кг	Напруження, МПа	Несуча здатність, кг	Розрахунковий опір, МПа	Коефіцієнт вичерпання
1	Зусилля відриву дюбеля з шурупом	115.2	-	150...500	-	0.77...0.23
2	Максимальні напруження в кронштейнах	-	174.4	-	230	0.76
3	Максимальні напруження в профілі	-	143.5	-	230	0.63
4	Максимальні напруження в кріпильних елементах (клямерах)	-	188.1	-	230	0.82
5	Максимальні напруження в плитці в місцях кріплення	-	13.2	-	10	1.32

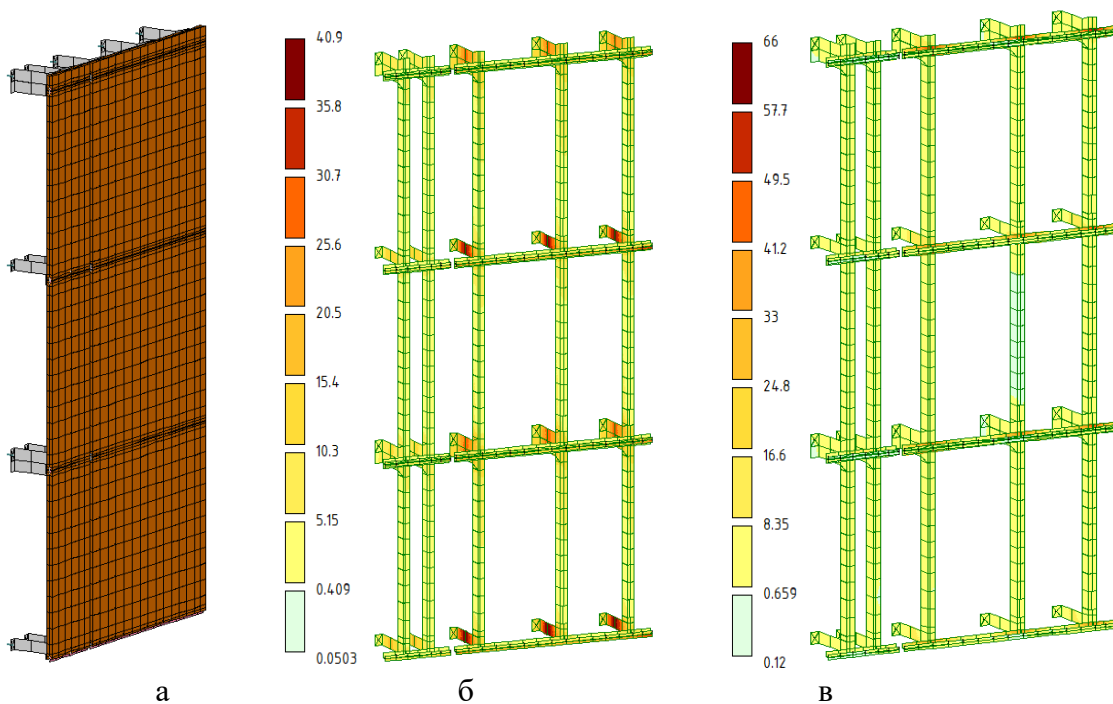


Рис. 12. Фрагмент розрахункової моделі (а), напруження в елементах кріплення (б, в) системи типу «KMD VF», МПа

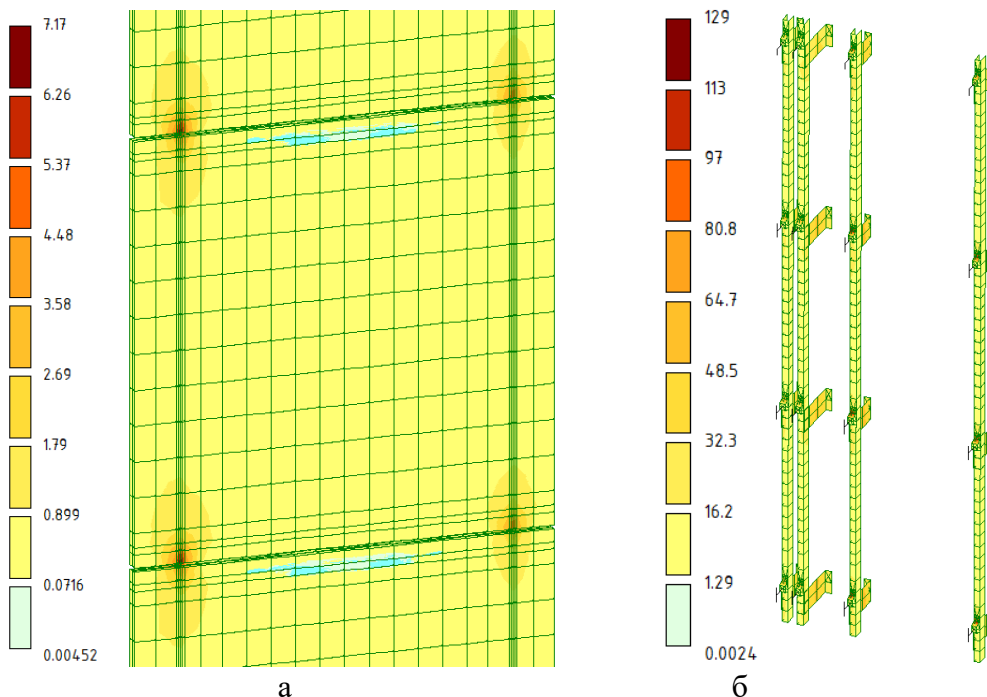


Рис. 13. Максимальні напруження в елементах фасадної системи з кроком вертикальних кронштейнів 1 м системи типу «АКАМ», МПа: а – у вузлах з'єднання плити з системою кріплення; б – у системі кріплення

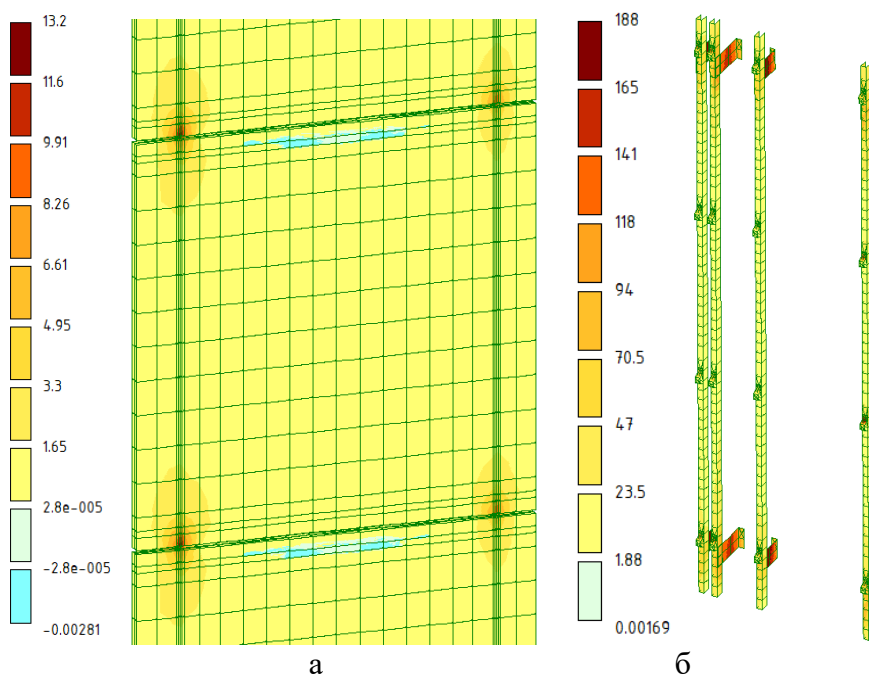


Рис. 14. Максимальні напруження в елементах фасадної системи з кроком вертикальних кронштейнів 3 м системи типу «АКАМ», МПа: а – у вузлах з'єднання плити з системою кріплення; б – у системі кріплення

Висновки. На підставі виконаних комплексних досліджень фасадної системи, що включали як експериментальні лабораторні випробування її фрагментів, так і чисельне моделювання на сейсмічні впливи, можна зробити такі висновки:

1. Стійкість до вібраційних і динамічних впливів. Експериментальні випробування показали високу живучість фасадної системи для рівня навантаження, що відповідає приблизно 60 % дев'ятибальної сейсміки. Система типу «KMD VF» зберігала цілісність, падіння окремих плиток не відбувалося, а вузли сполучення елементів залишалися надійними. Експериментально і розрахунково отримано руйнування окремих плиток у вузлах кріплення системи типу «АКАМ». Отримані під час експериментів напруження збігаються з результатами чисельних розрахунків, при цьому похибка не перевищує 7 %. Це підтверджує адекватність розробленої розрахункової схеми та методики, що є основою для достовірності подальших прогнозів.

2. Сейсмостійкість і запаси міцності. Спектральний розрахунок фасадної системи, яка працює спільно з багатопверховим будинком висотою 36 м, на сейсмічні впливи встановив:

- система типу «KMD VF» – вичерпання несучої здатності системи в цілому від дев'ятибальної сейсміки не перевищує 65 %. Це означає, що зберігається значний запас міцності – 35 %. Крім того, захист від падіння окремих плиток забезпечено із запасом 57 %. Ці кількісні показники свідчать про високий

рівень надійності системи за умов сейсмічних навантажень;

- система типу «АКАМ» із вертикальним кроком кронштейнів 1 м – вичерпання несучої здатності системи в цілому від сейсміки 9 не перевищує 72 % (збережено 28 % міцності) і визначено міцністю плитки в місцях її кріплення. При цьому підсистема кріплення зберігає 44 % міцності;

- система типу «АКАМ» із вертикальним кроком кронштейнів 3 м – вичерпання несучої здатності системи в цілому від сейсміки 9 становить 139 % (відбувається руйнація окремих плиток у місцях кріплення). При цьому підсистема кріплення зберігає 18 % міцності.

3. На підставі отриманих результатів, які підтверджують як експериментальну живучість, так і достатні запаси міцності для розрахунків на сейсмічні навантаження, зроблено висновок про можливість і доцільність використання навісних вентилязованих фасадів типу «KMD VF» з оздобленням фасадною плиткою Vratza 1000x1000x30 (із сіткою та без неї) для будівництва в сейсмонебезпечних районах України.

4. Використання вентилязованих фасадів типу «АКАМ» з оздобленням фасадною плиткою Vratza (із сіткою та без неї) і вертикальним кроком кронштейнів 1 м для будівництва у сейсмонебезпечних районах України можливе. Для висотних будівель, розташованих на території з розрахунковою сейсмічністю 9, не рекомендовано приймати вертикальний крок кронштейнів кріплення фасадної системи більше 1 м.

Список використаних джерел

1. Nascimbene, R. (2023). Editorial: Seismic vulnerability assessment of structural and non-structural components in industrial plants. *Front. Built Environ*, 9, 1289404. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1289404>
2. *UK Research and Innovation (UKRI)*. (2024). Project: ISCREANE: Innovative Seismic Assessment of Critical Non-Structural Elements. Gateway to Research. URL: <https://gtr.ukri.org/projects?ref=EP%2FZ002842%2F1>

3. Samali, B., & Abtahi, P. (2016). Evaluation of the effect of smart façade systems in reducing dynamic response of structures subjected to seismic loads. *Earthquakes and Structures*, 11(6), 983-1000. DOI: <https://doi.org/10.12989/eas.2016.11.6.983>
4. Di Sarno, L., Magliulo, G., D'Angela, D., & Cosenza, E. (2019). Experimental assessment of the seismic performance of hospital cabinets using shake table testing. *Earthquake Engng Struct Dyn*, 48, 103-123. DOI: <https://doi.org/10.1002/eqe.3127>
5. Coppola, O., De Luca, G., Franco, A., & Bonati, A. (2023). Experimental tests for seismic assessment of ventilated façades. *Procedia Structural Integrity*, 44, 758-765. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.01.099>
6. D'Amore, S., Bianchi, S., Ciurlanti, J., et al. (2023). Seismic assessment and finite element modeling of traditional vs innovative point fixed glass facade systems (PFGFS). *Bull Earthquake Eng*, 21, 2657-2689. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10518-023-01622-0>
7. El-Wahed, Mohamed Abd F., Gaawan, Moustafa S., & Yehia, Mohamed M. (2025). Experimental and Finite Element Analysis on Seismic Performance of Composite Shear Walls with Embedded Cold-Formed C-Shape Steel Section. *Trends in advanced sciences and technology*, 2, Article 1. DOI: <https://doi.org/10.62537/2974-444X.1029>
8. Aparicio-Fernández, C., Vivancos, J.-L., Ferrer-Gisbert, P., & Royo-Pastor, R. (2014). Energy performance of a ventilated façade by simulation with experimental validation. *Applied Thermal Engineering*, 66 (1–2). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.041>
9. Henzerkyi, Y., Barabash, M., Trusov, I., & Pervushova, L. (2023). Methods of assessing the seismic resistance of building structures and nuclear power plant structures in Lira-SAPR program. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 111, 125-139. DOI: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.111.125-139>
10. Pelletier, K., Wood, C., Calautit, J., & Wu, Y. (2023). The viability of double-skin façade systems in the 21st century: A systematic review and meta-analysis of the nexus of factors affecting ventilation and thermal performance, and building integration. *Building and Environment*, 228, 109870. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109870>
11. Ismaiel, M., Chen, Y., Cruz-Noguez, C., & Hagel, M. (2021). Thermal resistance of masonry walls: a literature review on influence factors, evaluation, and improvement. *Journal of Building Physics*, 45(4), 528-567. DOI: <https://doi.org/10.1177/17442591211009549>
12. ДБН В. 1.2-14-2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=27984
13. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=6617
14. ДБН В.1.2-6:2021. Основні вимоги до будівель і споруд. Механічний опір та стійкість. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=98029
15. ДБН В. 1.2-9-2008. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Основні вимоги до будівель і споруд. Безпека експлуатації. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=45886
16. ДБН В.1.1-45:2017. Будівлі і споруди в складних інженерно-геологічних умовах. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=71184
17. ДБН В.1.1-12:2014. Будівництво у сейсмічних районах України. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=58628
18. ДСТУ Б В.2.7-61:2008. Будівельні матеріали. Цегла та камені керамічні рядові і лицьові. Технічні умови (EN 771-1:2003, NEQ). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25434
19. Комплект карт ОСП-2004.

20. ДБН В.2.2-41:2019. *Висотні будівлі. Основні положення.*
URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=84353
21. ДБН В.2.1-10:2018. *Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення.*
URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=78687
22. ДБН В.2.6-33:2018. *Конструкції зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією. Вимоги до проектування.* URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=78182
23. ДСТУ-Н Б В.1.2-17:2016. *Настанова щодо науково-технічного моніторингу будівель і споруд.* URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=65024
24. ДСТУ-Н Б EN 1998-3:2012. *Єврокод 8. Проектування сейсмостійких конструкцій. Частина 3. Оцінка стану та відновлення будівель (EN 1998-3:2005, IDT). Зміна № 1.*
URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=104328

References

1. Nascimbene, R. (2023). Editorial: Seismic vulnerability assessment of structural and non-structural components in industrial plants. *Front. Built Environ*, 9, 1289404. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1289404>
2. UK Research and Innovation (UKRI). (2024). Project: ISCREANE: Innovative Seismic Assessment of Critical Non-Structural Elements. Gateway to Research. Retrieved from: <https://gtr.ukri.org/projects?ref=EP%2FZ002842%2F1>
3. Samali, B., & Abtahi, P. (2016). Evaluation of the effect of smart façade systems in reducing dynamic response of structures subjected to seismic loads. *Earthquakes and Structures*, 11(6), 983-1000. DOI: <https://doi.org/10.12989/eas.2016.11.6.983>
4. Di Sarno, L., Magliulo, G., D'Angela, D., & Cosenza, E. (2019). Experimental assessment of the seismic performance of hospital cabinets using shake table testing. *Earthquake Engng Struct Dyn*, 48, 103-123. DOI: <https://doi.org/10.1002/eqe.3127>
5. Coppola, O., De Luca, G., Franco, A., & Bonati, A. (2023). Experimental tests for seismic assessment of ventilated façades. *Procedia Structural Integrity*, 44, 758-765. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.01.099>
6. D'Amore, S., Bianchi, S., Ciurlanti, J., et al. (2023). Seismic assessment and finite element modeling of traditional vs innovative point fixed glass facade systems (PFGFS). *Bull Earthquake Eng*, 21, 2657-2689. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10518-023-01622-0>
7. El-Wahed, Mohamed Abd F., Gaawan, Moustafa S., & Yehia, Mohamed M. (2025). Experimental and Finite Element Analysis on Seismic Performance of Composite Shear Walls with Embedded Cold-Formed C-Shape Steel Section. *Trends in advanced sciences and technology*, 2, Article 1. DOI: <https://doi.org/10.62537/2974-444X.1029>
8. Aparicio-Fernández, C., Vivancos, J.-L., Ferrer-Gisbert, P., & Royo-Pastor, R. (2014). Energy performance of a ventilated façade by simulation with experimental validation. *Applied Thermal Engineering*, 66 (1–2). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.041>
9. Henzerkyi, Y., Barabash, M., Trusov, I., & Pervushova, L. (2023). Methods of assessing the seismic resistance of building structures and nuclear power plant structures in Lira-SAPR program. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 111, 125-139. DOI: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.111.125-139>
10. Pelletier, K., Wood, C., Calautit, J., & Wu, Y. (2023). The viability of double-skin façade systems in the 21st century: A systematic review and meta-analysis of the nexus of factors affecting

ventilation and thermal performance, and building integration. *Building and Environment*, 228, 109870. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109870>

11. Ismaiel, M., Chen, Y., Cruz-Noguez, C., & Hagel, M. (2021). Thermal resistance of masonry walls: a literature review on influence factors, evaluation, and improvement. *Journal of Building Physics*, 45(4), 528-567. DOI: <https://doi.org/10.1177/17442591211009549>

12. DBN V. 1.2-14-2009. (2009). *Zahalni pryntsyipy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktivnoi bezpeky budivel, sporud, budivelnykh konstruksii ta osnov* [General principles for ensuring the reliability and structural safety of buildings, structures, building structures and foundations]. Retrieved from: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=27984 [in Ukrainian].

13. DBN V.1.2-2:2006. (2006). *Navantazhennia i vplyvy* [Loads and impacts]. Retrieved from: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=6617 [in Ukrainian].

14. DBN V.1.2-6:2021. (2021). *Osnovni vymohy do budivel i sporud. Mekhanichnyi opir ta stiikist* [Basic requirements for buildings and structures. Mechanical resistance and stability]. Retrieved from: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=98029 [in Ukrainian].

15. DBN V. 1.2-9-2008. (2008). *Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnykh ob'ektiv. Osnovni vymohy do budivel i sporud. Bezpeka ekspluatatsii* [System for ensuring the reliability and safety of construction sites. Basic requirements for buildings and structures. Operational safety]. Retrieved from: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=45886 [in Ukrainian].

16. DBN V.1.1-45:2017. (2017). *Budivli i sporudy v skladnykh inzhenerno-heolohichnykh umovakh* [Buildings and structures in difficult engineering and geological conditions]. Retrieved from: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=71184 [in Ukrainian].

17. DBN V.1.1-12:2014. (2014). *Budivnytstvo u seismichnykh raionakh Ukrainy* [Construction in seismic areas of Ukraine]. Retrieved from: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=58628 [in Ukrainian].

18. DSTU B V.2.7-61:2008. (2008). *Budivelni materialy. Tshela ta kameni keramichni riadovi i lytsovi. Tekhnichni umovy (EN 771-1:2003, NEQ)* [Building materials. Ceramic bricks and stones, ordinary and facing. Technical conditions (EN 771-1:2003, NEQ)]. Retrieved from: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25434 [in Ukrainian].

19. Komplekt kart OSR-2004. (2004). Komplekt kart OSR-2004 [A set of OSR-2004 maps] [in Ukrainian].

20. DBN V.2.2-41:2019. (2019). *Vysotni budivli. Osnovni polozhennia* [High-rise buildings. Basic provisions]. Retrieved from: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=84353 [in Ukrainian].

21. DBN V.2.1-10:2018. (2018). *Osnovy i fundamenti budivel ta sporud. Osnovni polozhennia* [Foundations and foundations of buildings and structures. Basic provisions]. Retrieved from: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=78687 [in Ukrainian].

22. DBN V.2.6-33:2018. (2018). *Konstruksii zovnishnykh stin iz fasadnoiu teploizoliatsiieiu. Vymohy do proektuvannia* [External wall structures with facade thermal insulation. Design requirements]. Retrieved from: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=78182 [in Ukrainian].

23. DSTU-N B V.1.2-17:2016. (2016). *Nastanova shchodo naukovo-tekhnichnoho monitorynhu budivel i sporud* [Guidelines for scientific and technical monitoring of buildings and

structures]. Retrieved from: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=65024 [in Ukrainian].

24. DSTU-N B EN 1998-3:2012. (2012). *Evrokod 8. Proektuvannia seismostiikykh konstruksii. Chastyna 3. Otsinka stanu ta vidnovlennia budivel (EN 1998-3:2005, IDT). Zmina No. 1* [Eurocode 8. Design of structures for earthquake resistance. Part 3. Assessment and rehabilitation of buildings (EN 1998-3:2005, IDT). Amendment No. 1]. Retrieved from: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=104328 [in Ukrainian].

Дудін Олексій Аркадійович, кандидат технічних наук, доцент, декан будівельного факультету, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0002-6838-1669. Тел.: +38 (095) 090-72- 83. E-mail: dudin@kart.edu.ua.

Лобяк Олексій Вікторович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри будівельної механіки та гідравліки, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0002-9553-4245. Тел.: +38 (057) 730-10-70. E-mail: lobiak_bmg@kart.edu.ua.

Зверева Аліна Сергіївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничної колії та транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0002-4832-3760. Тел.: +38 (063) 867-20-51. E-mail: zveirievaAS@kart.edu.ua.

Троцько Владислав Володимирович, аспірант кафедри залізничної колії та транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 0009-0001-2091-7946. Тел.: +38 (050) 818 46 95. E-mail: mevs.mevs.mevs@gmail.com.

Dudin Oleksii, PhD., Assoc. Prof., Dean of the Civil Engineering Faculty, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0000-0002-6838-1669. Tel.: +38 (095) 090-72-83. E-mail: dudin@kart.edu.ua.

Lobiak Oleksii, PhD (Tech), Associate Professor, department of Structural Mechanics and Hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0000-0002-9553-4245. Tel.: +38 (057) 730-10-70. E-mail: lobiak_bmg@kart.edu.ua.

Zvierieva Alina, PhD (Tech), Associate Professor, department of Railway Tracks and Transport Facilities. ORCID ID: 0000-0002-4832-3760. Tel.: +38 (063) 867-20-51. E-mail: zveirievaAS@kart.edu.ua.

Trotsko Vladyslav, Postgraduate student at the Department of Railway Tracks and Transport Facilities, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0009-0001-2091-7946. Tel.: +38 (050) 818 46 95. E-mail: mevs.mevs.mevs@gmail.com.

Дата надходження статті 02.04.2026 р.

Дата прийняття статті до друку 19.05.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті 29.05.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY