

УДК 693.972:69.059.28

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.270224.69.1025

ПРОБЛЕМИ ПРОЕКТУВАННЯ ПРОМИСЛОВИХ БУДІВЕЛЬ З УРАХУВАННЯМ МОЖЛИВОСТІ ЛОКАЛЬНИХ РУЙНУВАНЬ ЇХ НЕСНИХ КОНСТРУКЦІЙ

ЕГОРОВ Є. А.^{1*}, *докт. техн. наук, проф.*,
РАДКЕВІЧ А. В.², *докт. техн. наук, проф.*,
КОВТУН К. А.³, *аспір.*

^{1*} Кафедра металевих та дерев'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.: +38 (0562) 46-93-62, e-mail: evg.egorov@ukr.net, ORCID ID : 0000-0002-0948-1299

² Кафедра технології будівельного виробництва та геодезії, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел.: +38 (0563) 73-15-44, e-mail: a.v.radkevich@ust.edu.ua, ORCID ID : 0000-0001-6325-8517

³ Кафедра технології будівельного виробництва та геодезії, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел.: +38 (0563) 73-15-44

Анотація. Постановка проблеми. Сьогоднішні реалії нашого буття показують, що проектування конструкцій будівель та споруд з урахуванням можливих локальних обвалів їх несних конструкцій стає все більш актуальною проблемою. Необхідність її вирішення – важлива складова у забезпеченні безпеки будівель і споруд за дії експлуатаційних та аварійних навантажень. Локальні руйнування трактуються як глобальний результат, який може спричинити руйнування усього каркаса або його значної частини та загибель людей. Особливість розрахунків на прогресуючий обвал будівель зі сталевим каркасом полягає в тому, що, на відміну від монолітного залізобетону, в сталевому каркасі вузли сполучення елементів виконуються, як правило, шарнірними і це може викликати перевернення конструктивної схеми на геометрично змінну конструктивну схему. У цьому випадку руйнування конструкцій може відбуватися не через втрату міцності матеріалу, а за рахунок втрати несної здатності вузлів з'єднання конструкцій. **Мета статті** – аналіз проблем, що виникають під час проектування (підсилення) конструкцій промислових будівель із сталевим каркасом, з урахуванням можливостей їх локальних руйнувань. **Висновок.** Розглянуто проблеми, які треба вирішувати під час проектування або реконструкції промислових будівель із сталевим каркасом, експлуатація яких може бути пов'язана з тими чи іншими локальними руйнуваннями несних конструкцій. Наводяться перспективні конструктивні шляхи ефективного вирішення цих проблем.

Ключові слова: *прогресуюче обвалення; сталевий каркас; ферми; монолітні залізобетонні конструкції; вузли-зв'язки*

ISSUES OF DESIGNING INDUSTRIAL BUILDINGS CONSIDERING THE RISK OF LOCAL DESTRUCTION OF THEIR BEARING STRUCTURES

EHOROV Yev.A.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
RADKEVICH A.V.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
KOVTON K.A.³, *Postgrad. Stud.*

^{1*} Department of Metal and Wooden Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (0562) 46-93-62, e-mail: evg.egorov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-0948-1299

² Department of Construction Technology and Geodesy, Ukrainian State University of Science and Technology, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel.: +38 (0563) 73-15-44, e-mail: a.v.radkevich@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6325-8517

³ Department of Construction Technology and Geodesy, Ukrainian State University of Science and Technology, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel.: +38 (0563) 73-15-44

Abstract. Problem statement. The present-day realities show that the design of buildings and structures with regard to possible local collapses of their bearing structures is becoming more and more realistic and thus an increasingly urgent challenge. The need to solve this issue is an important component in ensuring the safety of buildings and structures under operational and emergency loads. Local destruction is interpreted as a global result that can lead to the destruction of the entire frame or a significant part of it and cause loss of life. The peculiarity of calculations for

progressive collapse of steel-framed buildings is that, unlike monolithic reinforced concrete, in a steel frame, the nodes of connection of elements are usually hinged, and this can lead to transformation of the structural scheme into a geometrically variable structural scheme. In this case, structural failure may occur not due to loss of material strength, but due to loss of load-bearing capacity of the structural connection joints. *The purpose of the article* is to analyse the main specific peculiarities occurring in the design (reinforcement) of industrial buildings with steel frames, considering the possibility of their local destruction. *Conclusion.* The article considers some problems that need to be solved during the designing or reconstructing industrial buildings with a steel frame, the operation of which may be associated with some local destruction of the bearing structures. Prospective constructive ways of effectively solving these problems are presented.

Keywords: *progressive collapse; steel frame; trusses; monolithic reinforced concrete structures; connecting joints*

На даний час розроблено багато рекомендацій щодо проектування та розрахунків будівель і споруд, стійких до прогресуючих обвалень. В таких рекомендаціях розглядаються ті чи інші механізми руйнувань, пропонуються відповідні схеми розрахунків, побудовані, зокрема, на кінематичних методах. Розглядаються, як правило, рамні залізобетонні каркаси які дозволяють «загасити» або повинні (після підсилення) «загасити» локальні руйнування за рахунок включення в роботу інших конструкцій.

Мета статті полягає в аналізі основних особливостей, що виникають під час проектування (підсилення) конструкцій промислових будівель із сталевим каркасом, з урахуванням можливостей їх локальних руйнувань. Тобто вважається, що локальні руйнування неминучі і завдання проектувальника, таким чином, зводиться до мінімізації наслідків таких можливих руйнувань та, зокрема, недопущення розвинення прогресуючих руйнувань будівель.

Складність завдання полягає в тому, що у всіх існуючих рекомендаціях відсутні загальні принципи, за якими треба здійснювати:

- вибір ключових елементів (елементи, які треба розглядати як руйнівні під час розрахунку);
- вибір методу врахування миттєвих динамічних ефектів при обваленнях [4; 5];
- вибір основних концепцій проектування будівель і споруд, експлуатація яких пов'язана з можливістю руйнувань окремих їх несних елементів.

Особливість розрахунків на прогресуючий обвал будівель зі сталевим

каркасом полягає в тому, що, на відміну від монолітного залізобетону, в сталевому каркасі вузли сполучення елементів виконуються, як правило, шарнірними. Через це внаслідок локальних руйнувань тих чи інших конструкцій будівля в локальних зонах, і навіть у цілому, може перетворитися на геометрично змінювану конструктивну систему. Руйнування таких систем, як правило, пов'язується не з міцністю матеріалу конструктивних елементів, а з несною здатністю вузлів з'єднань.

Для прикладу розглянемо двопрогоновий просторовий сталевий каркас одноповерхової будівлі. У разі виключення з каркаса тієї чи іншої колони відразу падає крокв'яна ферма покриття (рис. 1).

Під час обвалення ферми на суміжні конструкції (кріплення конструкцій покриття, прогони та зв'язків) передаються додаткові (не передбачені в нормальних умовах експлуатації) вертикальні та горизонтальні зусилля. Конкретна їх величина буде безпосередньо залежати від конструктивного вирішення і дійсних (вище згадувалась шарнірна ідеалізація) властивостей вузлів з'єднання несних конструкцій між собою.

Стандартні вузли металоконструкцій не розраховані на додаткові зусилля, що виникають під час обвалення. Тому для захисту сталевих конструкцій каркаса від прогресуючого обвалення необхідно змінювати конструктивну схему роботи вузлів сполучення. І тут також можна запропонувати на вибір два шляхи: запроєктувати вузли, які сприймали б такі горизонтальні зусилля і завдяки цьому будуть утримувати ферму від повного

обвалення або, навпаки, зробити такі вузли, які б не сприймали горизонтальні зусилля і

таким чином локалізували ефект руйнування крокв'яної ферми.

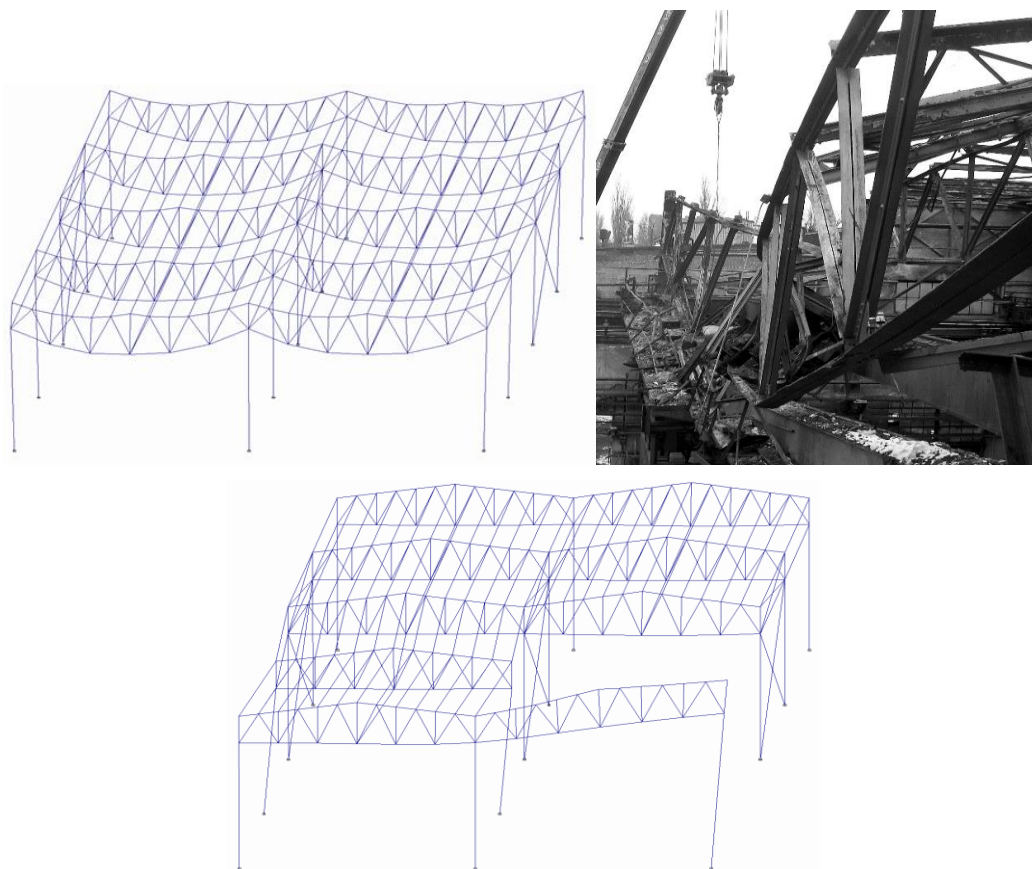


Рис. 1. Фрагменти деформованої схеми та вид на покриття одноповерхового сталевого каркаса після локального руйнування колони

Особливість промислових будівель – це наявність у них тих чи інших динамічних ефектів, які можуть стати важливим, а в деяких випадках визначальним фактором у з'ясуванні їх несної здатності, у тому числі, звичайно, і в разі можливих локальних руйнувань їх конструкцій.

Обчислювальні комплекси [6; 7] дозволяють урахувати статичну складову додаткових (за локальних обвалень конструкцій) зусиль. Але виникає питання, як визначити динамічну складову цих зусиль? Розроблення вузлів конструкцій будівель і споруд, що підвищують їх стійкість до різноманітних динамічних впливів, в тому числі і до локальних руйнувань, може бути пов'язане з використанням напівжорстких вузлів (semirigid) з'єднання різних елементів (наприклад, ригель – колона) і адаптивних зв'язків (наприклад, вертикальні в'язі, що включаються в динамічну роботу

конструкції або виключаються з неї, виконуючи тим самим відлаштування конструкції від резонансних частот).

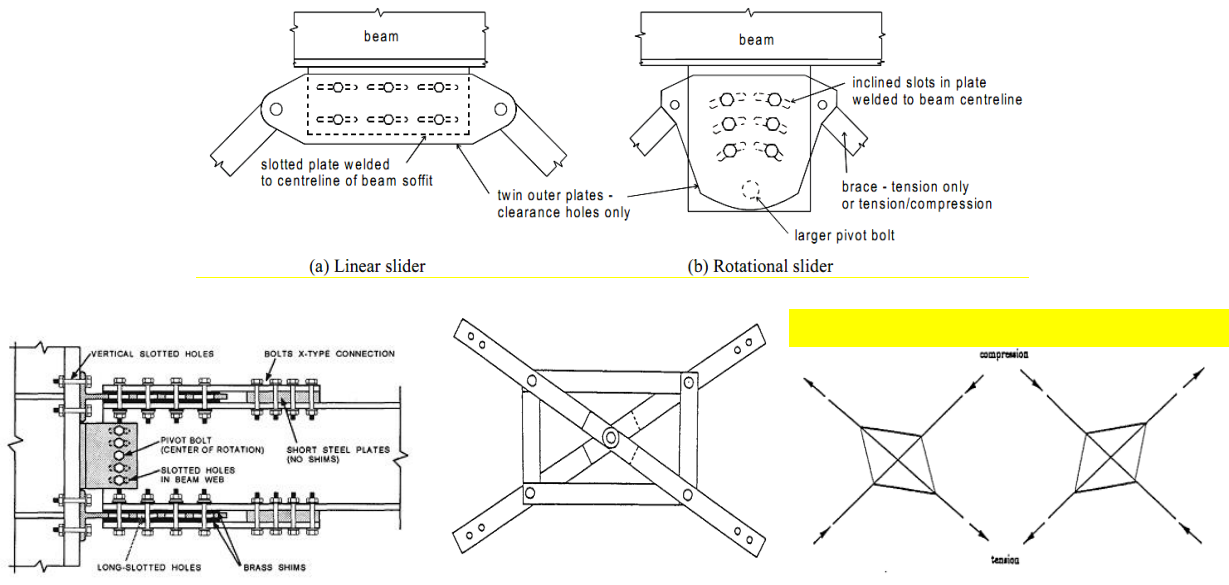
В обох випадках динамічні моделі конструкцій з такими рішеннями мають враховувати їх змінність у процесі нелінійних коливань і особливі дисипативні сили, що виникають на поверхнях, що контактують або забезпечуються роботою спеціальних демпферів. Демпфірування коливань у подібних конструкціях (конструкційне демпфірування) досить ефективно може реалізовуватись силами сухого тертя – кулонового чи позиційного. Питанням будівництва із застосуванням подібних пристроїв присвячені роботи [4; 5; 8].

Деякі принципові рішення виконання демпфірувальних пристроїв із сухим тертям наведені на рисунку 2. У випадку пружно-фрикційних з'єднань на високоміцних болтах допускаються контрольовані

зміщення за досягнення певного рівня зусиль. При цьому змінюється динамічна структура споруди і суттєво підвищується здатність конструкцій до поглинання енергії динамічного впливу [9; 10].

У спорудах рамного типу демпфірувальні пристрої частіше за все застосовують у

складі вертикальних в'язей (діагональних або V-подібних – рис. 3). Також можуть застосовуватись спеціальні важільні системи, що дозволяють підвищити чутливість демпфірувального пристрою.



6

Рис. 2. Конструкції демпферів сухого і позиційного тертя:

а – вузли демпферів рамно-в'язевої споруди [11]; б – напівжорстке з'єднання колони і ригеля, що здатне працювати як демпфер сухого тертя при поворотних у площині рами деформаціях [11]; в – фрикційний пристрій *rall friction damper* і його конфігурації в деформованих положеннях [10]

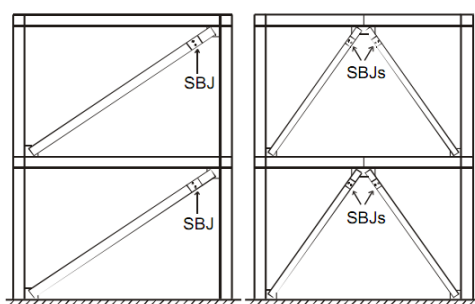


Рис. 3. Діагональна і V-подібна конфігурація в'язей з демпферами сухого тертя (*sliding bolted joint, SBJ*) – рухоме болтове з'єднання [12]

На рисунку 4 наведено конструктивну і спрощену динамічну модель рами, яка має три прогони і вертикальну в'язь із демпфером сухого тертя. Особливість такого виконання адаптивної в'язі рами – можливість її роботи в трьох режимах, що описуються моделями 1, 2 і 3 (розмір овальних отворів по вертикалі для вузла підходу в'язей до ригеля у всіх моделях такий, що зазор до болтів не вибирається і

вертикальне навантаження на в'язі від ригеля в такому вузлі не передається):

- модель 1: демпфірування коливань рами силами сухого тертя при горизонтальних амплітудах ригеля, що не перевищують величину вільного ходу демпфера (більшого діаметра отворів болтового з'єднання), при цьому стрижні в'язі ще не «включаються» в роботу рами;
- модель 2: при досягненні (перевищення неможливе) амплітудами

коливань вільного ходу демпфера – демпфер «виключається» з роботи, а стрижні в'язі, навпаки, починають працювати на осьові сили стиску/розтягу;

– модель 3: за надзвичайно великих навантажень (і переміщень) в'язь руйнується, наприклад, зрізуються болти

демпфера, втрачається стійкість стиснутого стрижня з вигином і т. п. і в'язь взагалі виключається з динамічної роботи рами.

Критерієм руйнування в'язі зручно обрати переміщення, за якого відбувається її руйнування.

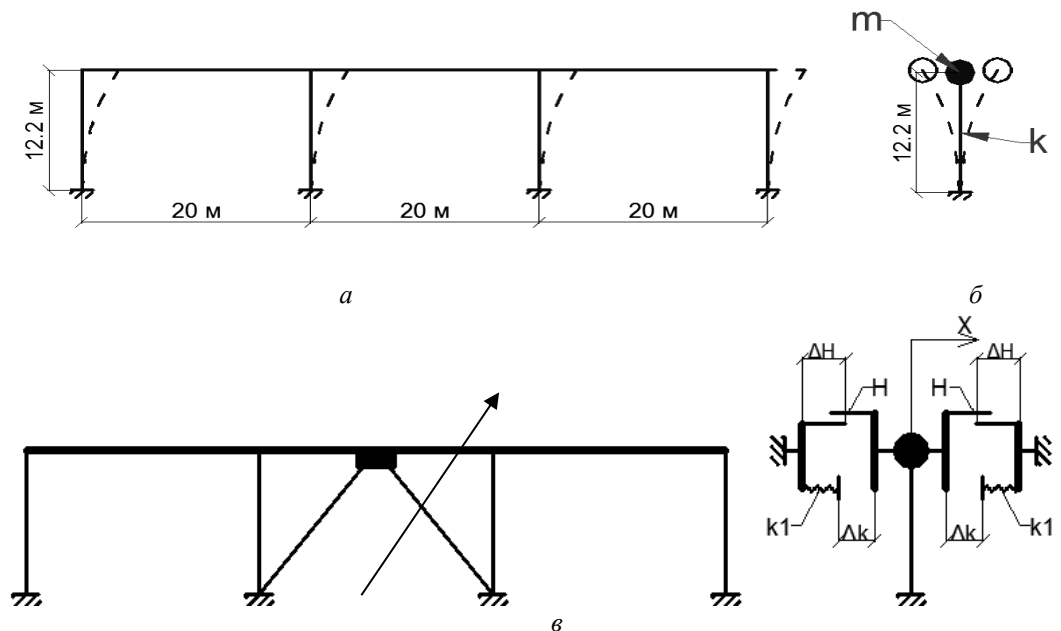


Рис. 4. Трипрогінна рама: а – вихідна модель трипрогінної рами і нижча форма її власних коливань; б – одномасова динамічна модель рами для наближеного дослідження коливань даної форми; в – конструктивна і спрощена динамічна модель рами, обладнаної вертикально в'яззю з демпфером сухого тертя

Звичайно, що ефективного рішення потребує конкретних розрахунків і подальших досліджень. Приблизно така ж ситуація має місце ц розгляді можливостей локальних руйнувань всіх інших конструкцій, що забезпечують загальну міцність, стійкість та жорсткість сталевго каркаса промислових будівель.

Таким чином, можна вважати, що взагалі проблеми, пов'язані з локальними руйнуваннями, можуть вирішуватися двома основними шляхами:

- загальне підсилення всіх елементів конструктивної схеми, яке б дозволяло сприймати додаткові статичні та динамічні зусилля і зберігати працездатний стан конструктивної схеми (будівлі) в цілому після локальних руйнувань окремих її несних елементів;

- застосування таких конструктивних схем, які б склалися з окремих незалежних блоків і руйнування будь-якого

з них не спричиняте непропорційно більшого руйнування.

В обох варіантах перспективним і дуже важливим виглядає розроблення спеціальних вузлів-зв'язків, які б дозволяли ефективно керувати просторовою взаємодією всіх елементів конструктивної схеми. При цьому матеріаломісткість та вартість будуть істотно нижчими, ніж у разі застосування загального посилення всіх несних конструкцій.

Висновки

Розглянуто проблеми, які треба вирішувати під час проектування або реконструкції промислових будівель зі сталевим каркасом, експлуатація яких може бути пов'язана з тими чи іншими локальними руйнуваннями несних конструкцій.

Наводяться перспективні конструктивні шляхи ефективного вирішення цих проблем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Поляков В. С., Килимник Л. Ш., Черкашин А. В. Современные методы сейсмозащиты зданий. Москва : Стройиздат, 1989.
2. Козловский А. Формирование стальных и комбинированных каркасов с полужесткими узлами. Жешув, 1999.
3. Semi-Rigid Structural Connections. IABSE Colloquium. Istanbul, 1996.
4. Кулябко В. В. Учет динамических свойств конструкций при создании нелинейных моделей, расчетах, конструировании и эксплуатации «безопасных по проекту» сооружений. *Взаимосвязь проектирования пространственных конструкций с вопросами безопасности, эксплуатационной надежности и долговечности : сб. науч. тр.* НИИЖБ, ЦНИИСК, НИИСП, 2007.
5. Kulyabko V. V., Davydov I. I. Laboratory of dynamics and diagnostics of constructions. *Archives of Civil Engineering*. Vol. 49, № 3. Warsaw : Polish Academy of Sciences, Institute of Fundamental Technological Research, 2003.
6. Лира 9. Коллектив авторов под редакцией Гродецкого А.С. Киев : Изд-во «Факт», 2003.
7. Карпиловский В. С., Криксунов Э. З., Маляренко А. А., Микитаренко М. А., Перельмутер А. В., Перельмутер М. А. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD. Изд-во АСВ, 2004.
8. Кархут І. І. Проектування та будівництво в районах з підвищеною сейсмічною активністю: навч. посіб. 2-е вид., доп. і перероб. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2015. 216 с.
9. Butterworth J., Clifton C. Performance of hierarchical friction dissipating joints in moment resisting steel frames. 12WCEE. 2000.
10. Aiken I. D., Nims D. K., Whittaker A. S., Kelly J. M. Testing of Passive Energy Dissipation Systems. *Earthquake Spectra*. Vol. 9, № 3. Earthquake Engineering Research Institute California, 1993.
11. Sigaher N., Constantinou M. C. Scissor-Jack-Damped Energy Dissipation System. *Earthquake Spectra*. Vol. 19, № 1. February 2003. Pp. 133–158.
12. Butterworth J. Ductile concentrically braced frames using slotted bolted joints. *SESOC Journal*. Vol. 13, № 1. April 2000.

REFERENCES

1. Polyakov B.C., Kilimnyk L.Sh. and Cherkashin A.B. *Sovremennyye metody seismozashchity passed* [Modern methods of seismic protection of buildings]. Moscow: Stroyizdat publ., 1989. (in Russian).
2. Kozlovsky A. *Formirovaniye stal'nykh i kombinirovannykh karkasov s poluzhestkimi uzлами* [Formation of steel and combined frames with semi-rigid nodes]. Rzeszów, 1999. (in Russian).
3. Semi-Rigid Structural Connections. IABSE Colloquium, Istanbul 1996.
4. Kulyabko V.V. *Uchet dinamicheskikh svoystv konstruktsey pri sozdanii nelineynykh modeley, raschetakh, konstruirovaniy i ekspluatatsii "bezopasnykh po proyektu" sooruzheniy* [Accounting for dynamic properties of structures when creating non-linear models, calculations, construction and operation of "safe by design" structures]. *Vzaimosvyaz' proyektirovaniya prostanstvennykh konstruktsey s voprosami bezopasnosti, ekspluatatsionnoy nadezhnosti i dolgovechnosti : sb. nauch. tr.* [Interrelationship between the design of spatial structures and issues of safety, operational reliability and durability : coll. scient. Works]. NIIZHB, TsNIISK, NIISP, 2007. (in Russian).
5. Kulyabko V.V. and Davydov I.I. Laboratory of dynamics and diagnostics of constructions. *Archives of Civil Engineering*. Vol. 49, no. 3, Warsaw : Polish Academy of Sciences, Institute of Fundamental Technological Research, 2003.
6. *Lira 9. Kollektiv avtorov pod redaktsiyey Grodet'skogo A.S.* [Lyra 9. The team of authors edited by A.S. Grodet'sky]. Kyiv : "Fact" Publ., 2003. (in Russian).
7. Karpilovsky V.S., Kryksunov E.Z., Malyarenko A.A., Mykytarenko M.A., Perelmuter A.V. and Perelmuter M.A. *SCAD Office. Vychislitel'nyy kompleks SCAD* [SCAD Office. Computing complex SCAD]. ASV Publ., 2004. (in Russian).
8. Karhut I.I. *Proektuvannya ta budivnytstvo v rayonakh z pidvyshchenoyu seysmichnoyu aktyvnistyu : navch. posib.* [Design and construction in areas with increased seismic activity : training manual]. 2nd ed., add. and processing. Lviv : Publishing House of Lviv Polytechnic, 2015, 216 p. (in Ukrainian).
9. Butterworth J. and Clifton C. Performance of hierarchical friction dissipating joints in moment resisting steel frames. 12WCEE. 2000.
10. Aiken I.D., Nims D.K., Whittaker A.S. and Kelly J.M. Testing of Passive Energy Dissipation Systems. *Earthquake Spectra*. Vol. 9, no. 3, Earthquake Engineering Research Institute California, August 1993.
11. Sigaher N. and Constantinou M.C. Scissor-Jack-Damped Energy Dissipation System. *Earthquake Spectra*. Vol. 19, no. 1, February 2003, pp. 133–158.
12. Butterworth J. Ductile concentrically braced frames using slotted bolted joints. *SESOC Journal*. Vol. 13, no. 1, April 2000.

Надійшла до редакції: 11.03.2024.