

УДК 539.3

ПІДХОДИ ЩОДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ДО ПРОГРЕСУЮЧОГО ОБВАЛЕННЯ БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД, СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ

М.О. Вабіщевич,
д-р техн. наук

І.К. Фесун,
аспірант

Київський національний університет будівництва і архітектури

DOI: 10.32347/2410-2547.2023.110.256-263

Дослідження явища прогресуючого обвалення будівель і споруд на сьогодні є новим викликом з точки зору забезпечення надійності будівельних об'єктів та безпеки життєдіяльності людей. Величезна кількість будівель і споруд, зруйнованих внаслідок бойових дій, спочатку були лише локально пошкоджені, а їх нестійкість до прогресуючого обвалення зумовила ланцюгову реакцію, яка врешті призвела до повного руйнування об'єктів. Дослідження, зокрема чисельними методами, цього явища дасть змогу виконувати проектування нових будівель і споруд, а також переглянути умови безпечної експлуатації існуючих об'єктів з урахуванням забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення.

Ключові слова: прогресуюче обвалення, забезпечення стійкості, прямі методи, метод альтернативного шляху, нормативне забезпечення, відмова елемента, нелінійність, чисельні дослідження, надійність.

Вступ. Початок активного дослідження явища прогресуючого обвалення датується 60-и роками минулого століття, що зумовлено розвитком чисельних методів розрахунків та появою програмованих комп'ютерів. Всесвітньовідомі випадки прогресуючого обвалення будівель і споруд з величезною кількістю людських і матеріальних втрат, які трапилися за цей відносно короткий проміжок часу, доводять актуальність всебічного вивчення цього явища. Наприклад, зіткнення авіалайнерів з вежами Всесвітнього торгового центру не найбільшого в історії людства терористичного акту «9/11» спричинили явища прогресуючого обвалення. Руйнування як південної, так і північної веж відбулось не миттєво, а через 56 і 102 хвилини після ударів відповідно.

З початком повномасштабного вторгнення рф в Україну явище прогресуючого обвалення будівель та споруд набуло масового характеру. Чималий відсоток будівель і споруд, зруйнованих внаслідок бойових дій, спочатку були лише локально пошкоджені, але нестійкість конструкцій до прогресуючого обвалення зумовила ланцюгову реакцію, що призвела в результаті до їх повного руйнування. Таким чином, можна стверджувати, що актуальність цієї області дослідження є високою у світі та зокрема в Україні.

Мінімізація загрози виникнення та локалізація зон прогресуючого обвалення, з урахуванням реалій бойових дій, а також різноманітних

аварійних ситуацій у мирний час (природні стихії, терористичні акти, побутові вибухи, помилки при проектуванні та зведенні), на сьогодні є одними з найважливіших задач з точки зору забезпечення надійності будівельних об'єктів. На думку авторів, умови безпечної експлуатації існуючих будівель та споруд мають бути переглянуті з урахуванням стійкості до прогресуючого обвалення, а проектування нових об'єктів повинне виконуватись з урахуванням чітких вимог відповідних будівельних норм.

В цій роботі виконано огляд прийнятих підходів щодо забезпечення стійкості конструкцій до прогресуючого обвалення світі та в Україні, зокрема приділено увагу відповідному нормативному супроводу, передбаченого національною гілкою (ДБН, ДСТУ, Настанови тощо) нормативної бази України. До ключових об'єктів аналізу віднесені:

- загальноприйняті світові підходи;
- термінологія (терміни та визначення явища прогресуючого обвалення);
- сфери застосування;
- вимоги та рекомендації до об'ємно-планувальних та конструктивних рішень будівель та споруд;
- вимоги та рекомендації до розрахунків на стійкість до прогресуючого обвалення.

Короткий історичний нарис підходів до забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення будівель і споруд у світі. Відправною точкою зародження цієї теми дослідження стало часткове обвалення будівлі в 1968 р. «Ronan Point» в м. Лондон, Велика Британія. Вибух газу на 18-му поверсі вибив з будівлі несучу зовнішню стінову панель, що в результаті призвело до ланцюгового обвалення верхніх несучих конструкцій. Ця трагедія зумовила зміни в нормативних базах не лише Великої Британії та країн Європи, але і США та Канади, – були впроваджені перші рекомендації щодо забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення. Нові випадки прогресуючого обвалення споруд, що сталися згодом, зокрема: «Skyline Plaza» в 1973 р. (при зведенні каркасу); «Murrah Office Building» в 1995 р. (в результаті вибуху) та вже згаданого теракту «9/11» у 2001 р. підняли актуальність теми дослідження та зацікавленість наукової спільноти на суттєво вищій рівень [10].

Відповідно до будівельних нормативних документів передових країн світу, в першу чергу США, яка є лідером в області досліджень прогресуючого обвалення, можна виділити два основні підходи (див. рис. 1) щодо забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення. Це непрямі і прямі методи.

Непрямі методи характеризуються управлінням ризику виникнення обвалення будівель та споруд, тобто зменшенням можливості виникнення обвалення до мінімального рівня. Це досягається за рахунок, як організаційних, так і конструктивних заходів. До організаційних відносять: заборона зберігання вибухонебезпечних речовин, влаштування захисних екранів, посилення охорони об'єкта (контроль транспортної та терористичної загрози) тощо. До конструктивних належать заходи, що

забезпечують цілісність, нерозрізність та багатозв'язність конструктивних систем, посилення конструкцій, що знаходяться в небезпечних зонах тощо.

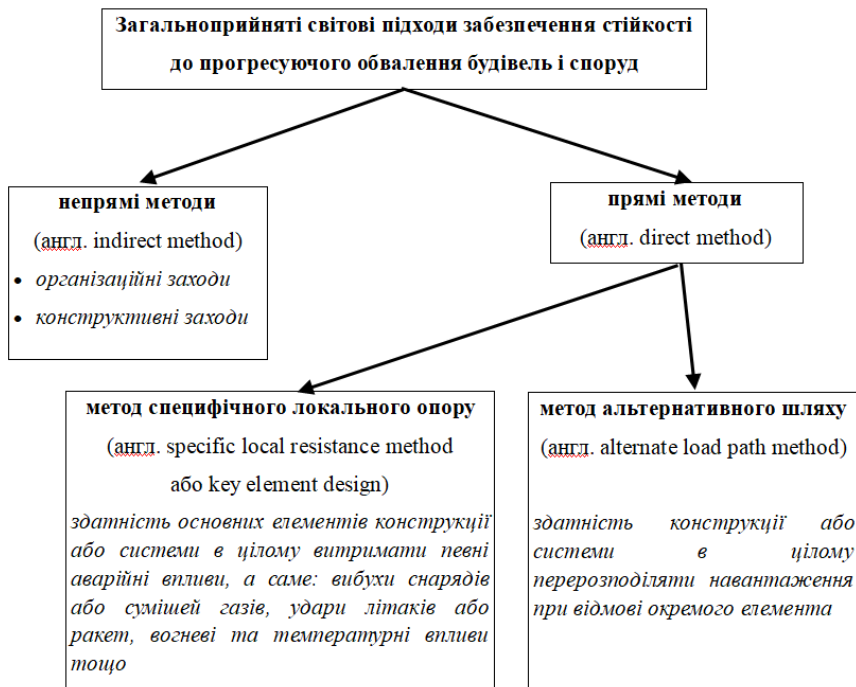


Рис. 1. Схема загальноприйнятних світових підходів забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення будівель і споруд

Прямі методи це метод специфічного локального опору та метод альтернативного шляху. Метод специфічного локального опору характеризується здатністю основних елементів конструкції або системи в цілому витримати певні аварійні впливи, а саме: вибухи снарядів або сумішей газів, удари літаків або ракет, вогневі та температурні впливи тощо. Метод альтернативного шляху передбачає забезпечення спроможності конструкції або системи в цілому перерозподіляти навантаження при відмові окремого елемента [5].

Загалом, метод альтернативного шляху здобув найбільшого поширення в світовій науковій спільноті, хоч і в конкретних випадках не є універсальним, і більшого того, проектні рішення, прийняті за результатами розрахунків за цим методом не є економічними та технологічними, порівняно з іншими методами. Однак, суттєвою перевагою цього методу є не розгляд причини, ймовірності та впливу на ключовий елемент певної аварійної ситуації (пожежі, вибуху, транспортного зіткнення тощо), а забезпечення роботоспроможності

системи без ключового елементу. Виділяють три можливих варіанти розрахунків [11]:

- лінійний статичний (прикладення статичного навантаження на систему з якої вже вилучено елемент) – має обмежене використання;
- нелінійний статичний (прикладення статичного навантаження на систему з якої вже вилучено елемент із урахуванням фізичної та геометричної нелінійності);
- нелінійний динамічний (миттєве вилучення елемента з системи із урахуванням фізичної та геометричної нелінійностей та прямого методу інтегрування рівняння руху).

Термінологія (терміни та визначення понять). Загалом, термінологія явища прогресуючого обвалення в нормативних документах України має невпорядкований характер. Крім вже названого «прогресуюче обвалення» можна зустріти ще «непропорційне руйнування» [1], «лавиноподібне руйнування» [1], «прогресуюче руйнування» [2], «непропорційне за обсягами порівняно з першопричиною пошкодження будівельного об'єкта в результаті будь-якого діяння» [3]. Це можна пояснити складністю перекладу з іноземних мов. Наприклад, в міжнародній спільноті, як правило, явище прогресуючого обвалення має лише один термін – це «progressive collapse». З «progressive» доволі просто знайти відповідність, а друге слово може мати лічену кількість перекладів лише тільки в технічній сфері, це як і руйнування, обрушення, і обвалення, і зрив, і, крах, і зім'яття тощо.

При цьому існує певна відмінність у визначенні поняття зазначеного явища:

а) в п.3.2. ДБН В.2.2-41:2019 Висотні будівлі. Основні положення [4]: *«прогресуюче обвалення – обвалення будівлі внаслідок локального руйнування частини несучих конструкцій на одному чи декількох поверхах»;*

б) в п.3.45. ДБН В.1.2-14:2018 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд [1]: *«непропорційне руйнування – процес глобального руйнування будівлі або споруди внаслідок локального пошкодження»;*

в) в п.3.2.3 ДСТУ-Н Б А.1.1-81:2008 Система стандартизації та нормування в будівництві. Основні вимоги до будівель і споруд. Настанова із застосування термінів основних вимог до будівель і споруд згідно з тлумачними документами Директиви Ради 89/106/ЄЕС [3]: *«непропорційне за обсягами порівняно з першопричиною пошкодження будівельного об'єкта в результаті будь-якого діяння – пошкодження будівель та споруд в результаті таких подій, як вибухи, ударні навантаження, перевантаження чи внаслідок людських помилок, яких можна було б уникнути чи обмежити без допустимих труднощів або витрат».*

Таким чином, ключова відмінність полягає у тому, що в першому та другому випадках явище обвалення це процес, а в третьому - результат; в другому випадку словосполучення «локальне пошкодження» не розкриває

поняття, що було пошкоджене, а також ділянку появи та величину пошкодження (як у першому випадку – руйнування частини несучих конструкцій на одному чи декількох поверхах); в третьому випадку відсутні деякі події, що можуть також впливати на пошкодження, наприклад, пожежі або карстові провали. До дискусійних питань можна віднести і доречність використання слова «прогресуючий», оскільки будь-яке руйнування/обвалення це процес, що відбувається (спостерігається) в часі. Тому можна допустити, що непрогресуючого обвалення не може існувати.

Сфера застосування. Відповідно до п. 4.1.6 ДБН В.1.2-14:2018 [1] будівельні конструкції й основи повинні відповідати ряду вимог, у тому числі «мати живучість по відношенню до локальних руйнувань і передбаченими нормами аварійних впливів (пожеж, вибухів, наїздів транспортних засобів), виключаючи при цьому явища непропорційного руйнування, коли загальні пошкодження виявляються значно більшими, ніж первісне збурення, що їх викликало», однак при цьому відповідно до п. 6.4.1 ДБН В.1.2-14:2018 [1] «розрахунок на непропорційне руйнування під дією аварійних навантажень проводиться для об'єктів класів наслідків СС2 та СС3, якщо не передбачені інші заходи, які виключають їх непропорційне руйнування». Виникає питання, а чи можливо повністю виключити прогресуючого обвалення? На думку науковців з США [5], ризик виникнення прогресуючого обвалення будівель та споруд неможливо усунути, але їм можна керувати. Таким чином, згідно вищезгаданого документа розрахунок на прогресуюче обвалення можна не виконувати за умови виконання інших заходів, що не зовсім логічно сприймається.

Також відповідно до п. 4.2. ДБН В.1.1-7:2016 [6] «будинки, що мають клас наслідків (відповідальності) СС3 слід розраховувати на стійкість до прогресуючого обвалення внаслідок пожежі», що в свою чергу, порівнюючи з п. 6.4.1 ДБН В.1.2-14:2018 [1] та п. 4.15 ДСТУ-Н Б В.2.6-205:2015 [7], ігнорує об'єкти класу відповідальності СС2.

Вимоги та рекомендації до об'ємно-планувальних та конструктивних рішень будівель та споруд. Ці вимоги та рекомендації за діючими нормативними документами України досить узагальнені та не вміщують прикладного значення. До основних можна віднести:

- розгляд декількох об'ємно-планувальних рішень (не менше 3 для СС2, не менше 5 для СС3) [8];
- нерозрізність конструктивної схеми будівлі [1, 4, 7];
- застосування рамних і багатів'язевих систем [4];
- застосування систем захисту вузлів та елементів каркаса [1, 4];
- резервування несучої здатності головних несучих конструкцій [1];
- включення до роботи просторової системи ненесучих конструкцій [1, 9].

Вимоги та рекомендації до розрахунків на стійкість до прогресуючого обвалення. Ці вимоги наводяться переважно в нормативних документах України, які набули чинності не раніше 2015 року. Ключовими пунктами цих вимог є:

- виконання розрахунків на аварійні сполучення навантажень [4, 7];

- виконання розрахунків з урахуванням фізичної нелінійності матеріалів [4, 9];
- виконання розрахунків з урахуванням геометричної нелінійності конструкцій [9];
- виконання розрахунків шляхом видалення окремих конструкцій з конструктивної системи (зусилля в конструкціях категорії А збільшуються на коефіцієнт динамічності не менше ніж 1,2; площа поперечного перерізу всіх вилучених (демонтованих) вертикальних елементів, розташованих на ділянці 80 м^2 , не повинна перевищувати для залізобетонних елементів $0,9 \text{ м}^2$, для фібробетонних, сталезалізобетонних елементів – $0,7 \text{ м}^2$, для жорсткої арматури та сталевих елементів – 15%) [4];
- прийняття розрахункових опорів матеріалів, що відповідають їх характеристичним значенням [4, 7];
- прийняття коефіцієнтів надійності за навантаженням за одиницю [7];
- нерегламентування величини деформацій і ширину тріщин [4, 7].

Слід зазначити про відсутність алгоритму виконання розрахунків на стійкість до прогресуючого обвалення в нормативній базі України. Тобто для виконання обов'язкових вимог норм щодо розрахунку конструкцій на явище прогресуючого обвалення інженер-проектувальник повинен змоделювати цей процес на основі виключно власного досвіду, рекомендацій розробників обчислювальних комплексів та довідкової літератури. Також виникають питання щодо визначення критерію руйнування конструкцій, постановки задачі (статична чи динамічна), способів врахування нелінійної роботи конструкцій тощо.

Висновок. Сучасний стан національної гілки нормативної бази України щодо стійкості до прогресуючого обвалення будівель та споруд можна охарактеризувати, як малозабезпечений та невпорядкований. Це стосується питань, як термінології, так і сфери застосування.

Ключовим є те, що окремими державними нормативними документами у сфері будівництва встановлено вимогу виконання умови забезпечення стійкості проти прогресуючого обвалення, однак норм, які б регламентували чіткий алгоритм дій з дотримання цих вимог поки не розроблено.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. – К.: Мінрегіонбуд України, 2018. – 36 с. – Чинний від 01.01.2019.
2. ДСТУ-Н Б В.1.1-41:2016. Настанова щодо проектування будівель і споруд на закарстованих територіях. – К.: Мінрегіонбуд України, 2008. – 94 с. – Чинний від 01.04.2019.
3. ДСТУ-Н Б А.1.1-81:2008. Система стандартизації та нормування в будівництві. Основні вимоги до будівель і споруд. Настанова із застосування термінів основних вимог до будівель і споруд згідно з тлумачними документами Директиви Ради 89/106/СЕС. – К.: Мінрегіон України, 2008. – 11 с. – Чинний від 01.10.2008.
4. ДБН В.2.2-41:2019. Висотні будівлі. Основні положення. – К.: Мінрегіонбуд України, 2019. – 50 с. – Чинний від 01.01.2020.
5. *Ellingwood B.R.* et al. Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings. – 2007.

6. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. – К.: Мінрегіонбуд України, 2017. – 39 с.
7. ДСТУ-Н Б В.2.6-205:2015. Настанова з проєктування монолітних бетонних і залізобетонних конструкцій будівель та споруд. – К.: Мінрегіон України, 2015. – 28 с. – Чинний від 01.01.2016.
8. ДБН В.2.2-16:2019. Культурно-видовищні та дозвілсві заклади. – К.: Мінрегіонбуд України, 2019. – 97 с. – Чинний від 01.11.2019.
9. Наказ від 06.08.2022 № 144 Міністерства розвитку громад та територій України «Про затвердження Методики проведення обстеження та оформлення його результатів».
10. *R. Shankar Nair*. Progressive Collapse Basics // *ModernSteelConstruction*. – 2004.
11. *Першаков В.М.* Проблеми протидії конструкцій прогресуючому обваленню будівель та споруд : монографія / В. М. Першаков, М. С. Барабаш, А. О. Белятинський, К. М. Лисницька. – К. : НАУ, 2015. – 456 с.

REFERENCES

1. DBN V.1.2-14:2018. Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnnykh ob'ektiv. Zahalni pryntsypy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktivnoi bezpeky budivel i sporud (The system for ensuring the reliability and safety of construction objects. General principles of ensuring the reliability and structural safety of buildings and structures). – K.: Minrehionbud Ukrainy, 2018. – 36 s. – Chynnyi vid 01.01.2019.
2. DSTU-N B V.1.1-41:2016. Nastanova shchodo proektuvannia budivel i sporud na zakarstovanykh terytoriakh (Guidelines for the design of buildings and structures in karst territories). – K.: Minrehionbud Ukrainy, 2008. – 94 s. – Chynnyi vid 01.04.2019.
3. DSTU-N B A.1.1-81:2008. Systema standartyzatsii ta normuvannia v budivnytstvi. Osnovni vymohy do budivel i sporud. Nastanova iz zastosuvannia terminiv osnovnykh vymoh do budivel i sporud zghidno z tlumachnymy dokumentamy Dyrektyvy Rady 89/106/leES (System of standardization and ration in gin construction. Basic requirements for buildings and structures. Guideline on the application of the terms of the basic requirements for buildings and structures in accordance with the interpretative documents of the Council Directive 89/106/EEC). – K.: Minrehion Ukrainy, 2008. – 11 s. – Chynnyi vid 01.10.2008.
4. DBN V.2.2-41:2019. Vysotni budivli. Osnovni polozhennia (High-rise buildings. Substantive provisions). – K.: Minrehionbud Ukrainy, 2019. – 50 s. – Chynnyi vid 01.01.2020.
5. *Ellingwood B.R.* et al. Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings. – 2007.
6. DBN V.1.1-7:2016. Pozhezhna bezpeka ob'ektiv budivnytstva (Fire safety of construction sites). – K.: Minrehionbud Ukrainy, 2017. – 39 s.
7. DSTU-N B V.2.6-205:2015. Nastanova z proektuvannia monolitnykh betonnykh i zalizobetonnykh konstruktii budivel ta sporud (Guidelines for the design of monolithic concrete and reinforced concrete structures of buildings and structures). – K.: Minrehion Ukrainy, 2015. – 28 s. – Chynnyivid 01.01.2016.
8. DBN V.2.2-16:2019. Kulturno-vydovyshchni ta dozvillievi zaklady (Cultural and entertainment facilities). – K.: Minrehionbud Ukrainy, 2019. – 97 s. – Chynnyivid 01.11.2019.
9. Nakaz vid 06.08.2022 № 144 Ministerstva rozvytku hromad ta terytorii Ukrainy «Pro zatverdzhennia Metodyky provedennia obstezhennia ta oformlennia yoho rezultativ» (About the approval of the Survey Methodology and registration of its results).
10. *R. Shankar Nair*. ProgressiveCollapseBasics // *ModernSteelConstruction*. – 2004.
11. *Pershakov V.M.* Problemy protydii konstruktii prohresiuuochomu obvalenniu budivel ta sporud (Problems of resistance of structures to the progressive collapse of buildings and structures): monohrafiia / V. M. Pershakov, M. S. Barabash, A. O. Bieliatynskiy, K. M. Lysnytska. – K. : NAU, 2015. – 456 s.

Стаття надійшла 17.05.2023

Вабіцевич М.О., Фесун І.К.

ПІДХОДИ ЩОДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ДО ПРОГРЕСУЮЧОГО ОБВАЛЕННЯ БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД, СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ

У статті виконано огляд прийнятих підходів щодо забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення будівель і споруд у світі та в Україні, зокрема приділено увагу нормативного забезпечення щодо стійкості до прогресуючого обвалення. Дослідження прогресуючого обвалення будівель і споруд на сьогодні є новим викликом для забезпечення

безпеки життєдіяльності людей. Величезна кількість будівель і споруд, зруйнованих внаслідок бойових дій, спочатку були лише локально пошкоджені, а їх нестійкість до прогресуючого обвалення зумовила ланцюгову реакцію, що вилитись в результаті в повне руйнування. Вивчення цього явища дасть змогу виконувати проектування нових будівель і споруд, а також перегляд безпечної експлуатації існуючих з урахуванням забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення.

Ключові слова: прогресуюче обвалення, метод альтернативного шляху, нормативне забезпечення, нелінійність, розрахунки.

Vabishchevich M.O., Fesun I.K.

APPROACHES TO ENSURING RESISTANCE TO THE PROGRESSIVE COLLAPSE OF BUILDINGS AND STRUCTURES. CURRENT STATE AND PROSPECTS

The article provides an overview of accepted approaches to ensuring resistance to progress, in particular the collapse of buildings and structures in the world and in Ukraine, attention is paid to the normative provision of resistance to the progress of collapse. Research on the progress of the collapse of buildings and structures today is a new challenge for ensuring the safety of people's lives. A huge number of buildings and structures destroyed as a result of hostilities were initially only locally damaged, and their instability to the progression of the collapse caused a chain reaction that resulted in complete destruction. The study of this phenomenon will enable the project to support new buildings and structures, as well as to ensure the safe operation of existing ones by ensuring resistance to progressive collapse.

Keywords: progressive collapse, stability assurance, direct methods, alternative path method, regulatory support, element failure, nonlinearity, calculations.

УДК 539.3

Вабіщевич М.О., Фесун І.К. Підходи щодо забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення будівель та споруд. Сучасний стан та перспективи// Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2023. – Вип. 110. – С. 256-263.

У статті наводяться підходи до забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення будівель та споруд в Україні, яка буде корисною для інженерів-проектувальників та студентів будівельних спеціальностей ВНЗ.

Іл. 1. Бібліогр. 11 назв.

UDC 539.3

Vabishchevich M.O., Fesun I.K. Approaches to ensuring resistance to the progressive collapse of buildings and structures. Current state and prospects // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – К.: КНУБА, 2023. – Issue 110. – P. 256-263.

The article presents approaches to ensure resistance to the progressive collapse of buildings and structures in Ukraine, which will be useful for design engineers and students of construction specialties of universities.

Figs. 1. Refs. 11.

Автор: доктор технічних наук, доцент, професор кафедри будівельної механіки КНУБА ВАБІЩЕВИЧ Максим Олегович

Адреса: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Робочий тел.: +38 (044) 241-55-55

Мобільний тел.: +38 (050) 928-40-97

Email: vabix@ukr.net

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-0755-5186>

Автор: аспірантка кафедри будівельної механіки ФЕСУН Ігор Костянтинович

Адреса: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Мобільний тел.: +38 (098) 785-55-49

Email: fesuni99@gmail.com

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-6678-9900>