

УДК 624.048:004.15

## УРАХУВАННЯ ФАКТОРІВ РИЗИКІВ ВИНИКНЕННЯ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ НА ЕТАПІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БУДІВЕЛЬ

БАРАБАШ М.С.<sup>1\*</sup>, д. т. н., доцент

<sup>1\*</sup>Кафедра комп'ютерних технологій будівництва, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, Київ, Україна, 03058, тел.+380952863990, e\_mail:bmari@ukr.net, ORCID [0000-0003-2157-521X](https://orcid.org/0000-0003-2157-521X)

**Анотація. Мета.** Виконати класифікацію небезпек та можливих пошкоджень різних конструктивних елементів та запропонувати методику, що дозволяє уникнути невинуватих ризиків і втрат при експлуатації будинків. **Методика** полягає у визначенні ймовірності виникнення небажаних подій у різних можливих експлуатаційних ситуаціях та у розробці алгоритму розрахунку конструкцій з прогнозуванням їх поведінки при частковому руйнуванні, або частковій втраті їх несучої здатності. При неврахованих, непередбачених і невизначених факторах, що спричиняють руйнування конструкцій на етапі експлуатації, із застосуванням логічного аналізу і визначення ймовірності небажаних подій у різних можливих (навіть теоретично) експлуатаційних ситуаціях, які повинні бути сформульовані ще при проектуванні та зведенні висотного будинку; за допомогою логічних методів аналізу «дерев подій» або «дерев відмов» можливо визначити ризик перетворення аварійної ситуації на аварію та виявити ресурси запобігання виникненню прогресуючого обвалення конструкції. Застосовуючи правила теорії ймовірностей, знаходиться ймовірність небажаної події у вигляді функції безпеки. Розроблено метод аналізу наслідків відмов (АНВ) для ідентифікації небезпек, заснований на системному підході. АНВ є аналізом індуктивного типу, за допомогою якого систематично, на основі послідовного розгляду одного елемента за одним, аналізуються всі можливі види відмов або аварійні ситуації і виявляються їх результуючі впливи на конструктивну систему в цілому. **Результати.** Розроблені алгоритми дослідження відмов конструктивних елементів і конструктивних систем та запропонована методика визначення ризику аварії. Запропоновано запобіжні заходи забезпечення безпеки будівельного об'єкту. **Наукова новизна** полягає в удосконаленні методики визначення ризику аварії конструктивних елементів і конструктивних систем на основі методів статистичного моделювання. **Практична значимість.** За допомогою запропонованої методики можливо визначити чисельну оцінку ризику надзвичайної події в будівлі, що складається з системи конструктивних елементів з незалежними рівно можливими відмовами на будь-якому етапі експлуатації конструкції.

**Ключові слова:** технічний стан; комп'ютерні технології проектування; надійність; напружено-деформований стан; аварійний стан; несучі конструкції; ризик; нелінійний розрахунок

## УЧЕТ ФАКТОРОВ РИСКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ЭТАПЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗДАНИЙ

БАРАБАШ М.С.<sup>1\*</sup>, д. т. н., доцент

<sup>1\*</sup>Кафедра компьютерных технологий строительства, Национальный авиационный университет, пр. Комарова, 1, Киев, Украина, 03058, тел.+380952863990, E\_mail: [bmari@ukr.net](mailto:bmari@ukr.net), ORCID [0000-0003-2157-521X](https://orcid.org/0000-0003-2157-521X)

**Аннотация. Цель.** Выполнить классификацию опасностей и возможных повреждений различных конструктивных элементов и предложить методику, позволяющую избежать неоправданных рисков и потерь при эксплуатации зданий. **Методика** заключается в определении вероятности возникновения нежелательных событий в различных возможных эксплуатационных ситуациях и разработке алгоритма расчета конструкций с прогнозированием их поведения при частичном разрушении или частичной потере их несущей способности. При неучтенных, непредвиденных и неопределенных факторах, вызывающих разрушение конструкций на этапе эксплуатации, с применением логического анализа и определения вероятности нежелательных событий в различных возможных (даже теоретически) эксплуатационных ситуациях, которые должны быть сформулированы еще при проектировании и возведении высотного дома; с помощью логических методов анализа «деревьев событий» или «деревьев отказов» можно определить риск превращения аварийной ситуации на аварию и выявить ресурсы предотвращения возникновения прогрессирующего обрушения конструкции. При использовании правил теории вероятностей, находится вероятность нежелательного события в виде функции опасности. Разработан метод анализа последствий отказов (АПО) для идентификации опасностей, основанный на системном подходе. АПО является анализом индуктивного типа, с помощью которого систематически, на основе последовательного рассмотрения одного элемента за другим, анализируются все возможные виды отказов или аварийные ситуации и выявляются их результирующие воздействия на конструктивную систему в целом. **Результаты.** Разработаны алгоритмы исследования отказов конструктивных элементов и конструктивных систем и предложена методика определения риска аварии. Предложены меры обеспечения безопасности строительного объекта. **Научная новизна** заключается в усовершенствовании методики определения риска аварии конструктивных элементов и конструктивных систем на основе методов статистического моделирования. **Практическая значимость.** С помощью предложенной

методики можно определить численную оценку риска чрезвычайного происшествия в здании, состоящего из системы конструктивных элементов с независимыми равновероятными отказами на любом этапе эксплуатации конструкции.

**Ключевые слова:** техническое состояние; компьютерные технологии проектирования; надежность; напряженно-деформированное состояние; аварийное состояние; несущие конструкции; риск; нелинейный расчет

## ACCOUNTING RISKS FACTORS OF APPEARANCE ACCIDENT SITUATIONS DURING EXPLOITATION OF BUILDINGS

BARABASH M.S.<sup>1</sup> *Dr. Sc., Ass.-prof.*

<sup>1</sup> Department of Computer Technologies of Construction, National Aviation University, pr. Komarova 1, Kiev 03058, tel.+380952863990, E\_mail: [bmari@ukr.net](mailto:bmari@ukr.net), ORCID 0000-0003-2157-521X

**Abstract. Aim.** To classify dangers and possible damages of different structural elements and develop methods that enable you to avoid undue risks and losses during maintenance of structures. **Methodology.** is to identify probability of undesirable consequences in different possible service situations and to develop the algorithm for analysis of structures with prediction of their behaviour in partial damage or partial bearing-capacity failure. If there are unaccounted, unforeseen and undefined factors that cause the damage of the structure at the stage of maintenance; when you apply logic analysis to determine probability of undesirable cases in different possible (even theoretically) service situations that should be stipulated during design and erection of high-rise building; when you apply logic methods for analysis of 'trees of cases' or 'trees of refuses', it is possible to measure the risk of transformation from emergency situation to an accident and to find out resources to avoid occurrence of progressive damage of the structure. Using theory of probability, we calculate probability of undesired case as a function of danger. The author develops method for analysis of consequences of refuses (ACR) to identify dangers. ACR is the inductive type of analysis, it helps to consider in series one element after another, evaluate all possible types of refuses or emergency situations and determine their total effect of the whole structural system. **Results.** The author presents research algorithms for refuses of structural elements and structural systems and develops method to measure the risk of an accident. Safety regulations for the building structure are also suggested. **Scientific novelty** of the paper is to enhance the method for measuring risk of an accident in structural elements and structural systems based on static simulation methods. **Practical significance.** This method enables you to determine numerical value of risk of emergency situation in the building that consists of a system of structural elements with independent equally possible refuses at any stage of the maintenance of the structure.

**Key words:** technical state; computer technologies of design; safety; stress strain state; emergency situation; bearing structures; risk; nonlinear analysis

### Вступ

На сучасному етапі в будівельному проектуванні відбувається перехід від основоположного критерію несучої здатності конструкцій до критерію безпеки будівельних об'єктів для людей і навколишнього середовища протягом усього життєвого циклу будівельного об'єкта. Забезпечення безаварійної експлуатації існуючих будівель і споруд передбачає вміння прогнозувати їх поведінку при зміні умов експлуатації та в аварійних ситуаціях при частковій втраті несучої здатності, а для цього потрібні новітні методики, які дозволяють враховувати реальну роботу конструктивних систем.

Кожна будівля, споруда або окрема конструкція має функціональне призначення, експлуатується в певних умовах і обов'язково повинна задовольняти вимогам безпеки, тобто вимогам запобігання аварій і обвалень будівельного об'єкта в цілому або складових його частин, які можуть становити небезпеку для здоров'я та життя людей, або завдати шкоди довкіллю або послужити причиною інших аварійних ситуацій.

При зведенні та експлуатації висотних будинків, як об'єктів з підвищеними вимогами до безпеки, надійності та соціальної значущості, повинні бути чітко представлені три стратегії:

- моніторинг технічного стану конструктивних елементів, інженерних систем, приміщень і прилеглої території;
- комплекс заходів щодо попередження передчасного зносу і оперативного управління параметрами середовища проживання;
- стратегії, що передбачають усунення (ліквідацію) фізичного та морального зносу.

Розвиток комп'ютерних технологій проектування конструкцій, широке їх поширення та збільшення потужності комп'ютерів сприяли появі точних та високопродуктивних чисельних методів розрахунку та обумовили їх широке впровадження в розрахункову практику. Сучасні методи дослідження напружено-деформованого стану різних конструкцій базуються на утворенні дискретної моделі за допомогою скінченних елементів. Чисельні методи досліджень передбачають моделювання всього

процесу життєвого циклу об'єкту, тобто, від розрахунку та проектування до утилізації об'єкту.

Чисельні методи розрахунку конструкцій відображені в наступних працях вітчизняних, російських та зарубіжних [16,17] вчених: А. В. Александрова, В.А. Баженова, О.С. Городецького, А.В. Даркова, С. Ф. Клованича, А. В. Перельмутера [15], Р. А. Резникова, Л. А. Розіна, М. В. Савицького, В. І. Слівкера, А. Ф. Смірнова, Н. Н. Шапошнікова, А. П. Філіна, Н. М. Якупова та ін.

В питаннях надійності будівель та споруд накопичено значний досвід у плані визначення показників надійної та безвідмовної роботи будівельних об'єктів за умов нормальної експлуатації, тобто роботи у проектному режимі. Проте значна більшість об'єктів у реальних умовах експлуатації під впливом різноманітних непередбачених та невизначених факторів впливу змінюють проектні граничні умови, що створює пряму небезпеку руйнування. Так, на різних стадіях експлуатації об'єкта дія навантажень та впливів змінюються в просторі і в часі, за величиною і режимом, областю прикладення і напрямком; з'являються додаткові або непередбачувані навантаження, відбувається перерозподіл зусиль між елементами системи і навіть з одного координатного напрямку системи на інший, відбувається часткове або повне виключення в'язів, змінюється режим граничних умов, зменшується загальна жорсткість та демпфіруючі властивості.

Неврахування впливу факторів, що виникають і діють в умовах реальної експлуатації, створюючи підвищену деформативність та концентрацію напружень, змінюючи проектні умови силового та деформаційного опору, в кінцевому результаті веде до значного зниження експлуатаційної придатності та підвищення ризику руйнування.

Це зумовлює задачі удосконалення, по-перше, методів натурних досліджень по визначенню фактичного технічного стану конструкцій будівель та споруд в умовах реальної експлуатації з метою отримання найбільш достовірної та об'єктивної інформації про фактичні параметричні показники об'єкта, по-друге, вдосконалення методів аналізу напружено-деформованого стану об'єктів на основі отриманої достовірної, об'єктивної інформації про його фактичний технічний стан, відповідно діючих регламентованих норм, враховуючи реальні умови експлуатації об'єкта з метою ідентифікації прямих небезпек, які створюють ризики руйнування, що потребує уточнення відповідних методів розрахунків. Саме такий підхід дозволяє виявити небезпечні руйнівні тенденції у подальшій експлуатації об'єкта, своєчасно попередити загрозу руйнування, як окремих конструктивних елементів, так і об'єкта в цілому.

### Мета

Виконати аналіз небезпек, що дозволить уникнути невиправданих ризиків і втрат при

експлуатації будинків із застосуванням логічного аналізу і визначення ймовірності небажаних подій у різних можливих (навіть теоретично) експлуатаційних ситуаціях, які повинні бути сформульовані ще при проектуванні та зведенні будь-якого будинку.

### Методика

Згідно діючих норм проектування розрахунки будівель і споруд виконуються за методикою граничних станів, яка передбачає недопущення настання граничного стану чи відмови об'єкта у заданий термін експлуатації.

Але і тоді, коли будівельні об'єкти запроєктовані відповідно до діючих нормативних документів, все ж таки, виникають відмови, аварійні ситуації, часткове або повне руйнування будівельних конструкцій різного класу, а також будівельних об'єктів в цілому різного функціонального призначення та різного рівня відповідальності. Відповідно і наслідки заподіяної шкоди сягають від значних матеріальних збитків і людських жертв до соціальних втрат і катастроф [1, 2, 8].

Причинами відмов, аварій, часткового або повного руйнування будівель та споруд, як правило, є наслідок дій різних неврахованих, непередбачених і невизначених факторів, які не були враховані нормами проектування та умовами нормальної експлуатації, які пов'язані з людськими помилками та прорахунками або ті, які виникають від дії різноманітних комбінованих впливів та надзвичайних ситуацій. Досвід будівництва та експлуатації засвідчує, що однотипні будівлі та споруди, що знаходяться на однакових стадіях експлуатації та працюють в аналогічних умовах, виходять з ладу (виникають відмови, аварійні ситуації, відбувається часткове або повне руйнування) в різні випадкові моменти. Тобто неможливо остаточно визначити час настання граничного стану об'єкта, передбачити час і місце виникнення небезпечної події або остаточно визначити безвідмовний термін служби. Можливо лише надати оцінку як об'єкт експлуатується протягом заданого терміну та спрогнозувати виникнення відмов, небезпек чи аварійних ситуацій. Для зниження кількості руйнувань та аварійних ситуацій будівельних об'єктів, а також для зменшення заподіяної шкоди в разі їх виникнення, край необхідна розробка наукових підходів і досліджень які б максимально повно характеризували та прогнозували технічний стан об'єкта на різних часових стадіях його експлуатації. Тільки на основі об'єктивно визначеного фактичного технічного стану будівлі чи споруди з урахуванням реальних умов експлуатації можливо прогнозувати та надавати оцінку виникнення небезпечних подій, які приводять об'єкт до руйнівних тенденцій [4-6, 9].

При обстеженні технічного стану конструкцій будівель та споруд, що експлуатуються в складних

інженерно-геологічних умовах, технічному аналізу підлягає нижчезазначений комплекс питань.

1. Конструктивні рішення, типи фундаментів, глибина їх закладання.

2. Наявність геотехнічних або конструктивних заходів захисту і здатність сприймати впливи від нерівномірних деформацій основ.

3. Інженерно-геологічні умови і характеристики ґрунтів основ, здатність змінювати фізико-механічні властивості ґрунтів у результаті зміни гідрогеологічних режимів.

4. Наявність і плани прокладки водонесучих зовнішніх комунікацій.

5. Відстань до об'єктів новобудови.

6. Характер рельєфу місцевості і можливість розвитку зсувних процесів, підйому рівня підземних вод.

У разі нового будівництва на прилеглий території аналізуються:

1. Територіальне розташування і віддаленість від об'єкту, що будується, навколишньої забудови.

2. Конструктивні рішення будівельного об'єкту та огорожувальних конструкцій, для заходів підготовки території під будівництво, у тому числі: конструкції, що утримують схили при їх підрізуванні; конструкції, що утримують стінки котлованів.

3. Технологія ведення робіт по влаштуванню огорожувальних конструкцій, можливість прояву суфозійних процесів або подробики існуючих будинків, споруд і комунікацій.

4. Конструктивні рішення новобудови і типи фундаментів.

5. Технологію ведення будівельно-монтажних робіт і її здатність забезпечувати стійкість огорожувальних і утримуючих конструкцій, запобігання суфозійним процесам у ґрунтах.

На зсувонебезпечних територіях розрахунковому аналізу і обґрунтуванню підлягають наступні рішення.

1. Стійкість схилів до і після підрізування котлованами новобудов.

2. Утримуючі і огорожувальні споруди.

3. Можливість зміни гідрогеологічних режимів.

4. Безпека існуючих будівель при прояві факторів по п.п. 1, 2 і 3 (у тому числі з урахуванням впливу водонесучих зовнішніх комунікацій).

5. Можливість виникнення додаткових деформацій основи існуючих будівель від навантажень, що передаються на основу новобудовами.

6. Можливість попадання існуючих об'єктів у зону обвалення укосів при розробці котлованів.

Додаткові впливи класифікують, як: конструктивні, технологічні, геологічні, гідрогеологічні, кліматичні, техногенні.

До конструктивних слід відносити впливи, що залежать від конструктивних особливостей і параметрів об'єкту будівництва та експлуатаційних якостей і технічного стану існуючої забудови.

Додаткові впливи від розташованого поряд з існуючим новим будівництвом залежать від конструктивних рішень і параметрів об'єктів нового будівництва, можуть проявлятися у випадках коли:

– підземна частина нової споруди заглиблена нижче глибини закладання фундаментів існуючих будівель;

– від нової споруди виникають додаткові навантаження на основу чи одностороннє додаткове навантаження з боку нового будівництва;

– недостатня жорсткість чи глибина закладання конструкцій огороження котловану, що призводить до виникнення додаткових горизонтальних і вертикальних деформацій основи;

– виникає розвантаження і повторне завантаження дна котловану.

Впливи, що залежать від експлуатаційних якостей і технічного стану існуючої забудови, можуть проявлятися у випадках коли:

– в будинках існуючої забудови відсутні заходи захисту від нерівномірних деформацій основи;

– ведеться будівництво в зоні старої забудови і конструкції існуючих будинків мають значний фізичний знос, що знижує їх просторову жорсткість і здатність сприймати нерівномірні осідання чи додаткові навантаження;

– об'єкт будівництва розташовані на ґрунтах з особливими властивостями.

До технологічних слід відносити впливи, які залежать від технології, режиму і якості будівельних робіт.

До геологічних і гідрогеологічних слід відносити впливи, які залежать від характеристик і стану ґрунтів основи.

До кліматичних слід відносити впливи, які пов'язані з дією погодних і сезонних коливань температури, вологості, заморожування/відтавання.

Характер і величини проявів впливів залежать від наступних факторів:

– конструктивних особливостей об'єктів;

– експлуатаційних якостей і технічного стану забудови;

– особливостей природного середовища – розташування на схилі, у зонах осідання земної поверхні або можливих змін гідрогеологічних умов, в складних інженерно-геологічних умовах;

– техногенних умов;

– екологічних умов.

Вплив нового будівництва в умовах ущільненої забудови проявляється у вигляді додаткових осідань і кренів існуючих споруд і навколишньої території.

Додаткові осідання і крени існуючих будівель можуть виникати внаслідок наступних факторів:

– одностороннє довантаження основи з боку нового будівництва при відсутності або недостатності заходів захисту від впливу новобудови;

– виконання земляних робіт при відкритті котловану без урахування глибини закладання

існуючих фундаментів і стійкості бортів (укосів) стін котловану;

- спосіб виконання робіт при влаштуванні пальових фундаментів, при якому можливий виток обводнених ґрунтів з основи існуючих будівель;
- виконання земляних робіт при відкритті котловану без урахування положення підземних вод;
- можливості проморожування ґрунтів, порушення структури ґрунтів при роботі будівельних механізмів, затоплення котловану підземними та/чи поверхневими водами, перекопування ґрунту основи тощо;
- динамічні впливи на ґрунти основи і будівельні конструкції від працюючих будівельної та транспортної техніки, ліній метрополітену (особливо чутливі до дії динамічних впливів дрібні водонасичені піски) ;
- застосування водозниження;
- деструктивні процеси у ґрунтах майданчика;
- ерозія, зсуви, карстово-суфозійні явища, проморожування, осідання земної поверхні, зміна усталених гідрогеологічних умов та пов'язаних з нею підтоплення (у тому числі агресивними водами) або осушення забудованих територій.

Для житлових і громадських будівель найбільш вразливими частинами, з яких починається руйнування конструкцій споруди, є місця: в основі фундаментів, на цоколі та вимощені, у зовнішніх стінах, у перекритті, на покритті (даху), над і під віконними прорізами, інженерні мережі.

Ознаками незадовільного технічного стану та зменшення несучої здатності для різних груп конструкцій є наявність характерних дефектів і ушкоджень вказаних нижче.

Основи, фундаменти і підземні частини:

- тріщини викривлення рядів кладки стін підвальних приміщень;
- відхилення стін від вертикалі;
- наявність вологості, вилугування солей розчинів кладки, випадання окремих каменів кладки фундаментів і стін підвальних приміщень;
- наявність ґрунтових вод або ознаки руйнування підлог у підвальних приміщеннях, наявність тріщин між цоколем будівлі та тротуаром або вимощенням;
- відшарування штукатурки кам'яних стін та руйнування залізобетонних стінових панелей у підвальних приміщеннях;
- протікання водонесучих комунікацій.

Колони, пілони, діафрагми:

- тріщини, виколи у залізобетонних конструкціях;
- руйнування поверхні бетону, наявність оголеної арматури;
- корозія арматури;
- порушення спряжень з несучими конструкціями перекриттів та покриттів;
- тріщини у кутах в місцях спряження з горизонтальними несучими конструктивними елементами.

Стіни, фасади:

- тріщини у місцях спряження цегляних стін і несучих конструкцій перекриттів та покриттів, еркерів, балконів;
- розшарування рядів кладки, руйнування, випадання окремих каменів або вивітрювання розчину;
- послаблення кріплення елементів парапетів, карнизів та інших архітектурних деталей;
- тріщини у кладці склепінь (особливо у п'ятах та замках);
- зволоження у місцях водостічних труб;
- відшарування облицювання стін фасадів;
- відхилення стін від вертикалі;
- випинання та просідання окремих ділянок стін;
- порушення водо- і повітропроникності стиків.

Дахи, покриття:

- послаблення кріплень покрівлі, особливо у місцях спряження з водостічними трубами;
- ураження деревини шкідниками, значні прогини крокв, прогонів;
- руйнування поверхні бетону, наявність оголеної арматури, тріщини, виколи у залізобетонних конструкціях покриттів;
- корозія сталевих покрівель, пробоїн, розкриття фальців;
- здимання, розриви та пробоїни, місцеві просідання, розшарування рулонного килима, розтріскування покриття;
- пошкодження, зміщення та випадання окремих елементів шиферних, черепичних і дерев'яних покрівель;
- відсутність скління слухових вікон;
- пошкодження теплоізоляції трубопроводів системи центрального опалення та вентиляційних пристроїв;
- засмічення жолобів і водоприймальних лійок;
- ослаблення кріплення водостічних лотків, труб, нещільність з'єднань ланок труб.
- нещільність примикання гідроізоляційного килима до водоприймальних лійок.

Перекриття, підлоги:

- ураження шкідниками дерев'яних балок;
- прогини, тріщини у стелях;
- хиткість підлог;
- оголення арматури у залізобетонних перекриттях;
- відшарування керамічних, мозаїчних плиток, розриви підлог з лінолеуму та синтетичних матеріалів.

Сходи:

- порушення спряжень площадок і маршів між собою і зі стінами;
- прогини сходових площадок і маршів;
- тріщини у кутах в місцях спряження поперечних несучих стін сходової клітки із зовнішніми стінами;

- надійність кріплень огорожень і поручнів.  
Балкони, еркери, навіси, козирки:
- тріщини у балконних плитах і консолях у місцях їх кріплень;
- надійність кріплення балконного огороження до стін і балконної плити.

Варто відмітити, що пошкодження конструкцій (або будівлі в цілому) може бути під впливом реологічних процесів та в разі дії форс-мажорних обставин. Для оцінки ризику небезпек руйнування конструкцій в експлуатаційній стадії приведено структурну схему оцінки технічного стану [11,14] конструкцій (рис.1)

Для аналізу частоти виникнення аварійної

оцінкою технічного стану конструкцій на етапі експлуатації будівлі.

Кількісний аналіз небезпек дає можливість визначити ймовірності аварій і нещасних випадків, величину ризику, величину наслідків. Методи розрахунку ймовірностей і статистичний аналіз є складовими частинами кількісного аналізу небезпек. Встановлення логічних в'язів між подіями необхідно для розрахунку ймовірностей аварій.

При аналізі небезпек складні системи розбивають на підсистеми. Підсистеми виділяють за певною ознакою, що відповідає конкретним цілям і задачам функціонування системи. Підсистема може розглядатися як самостійна система, що складається

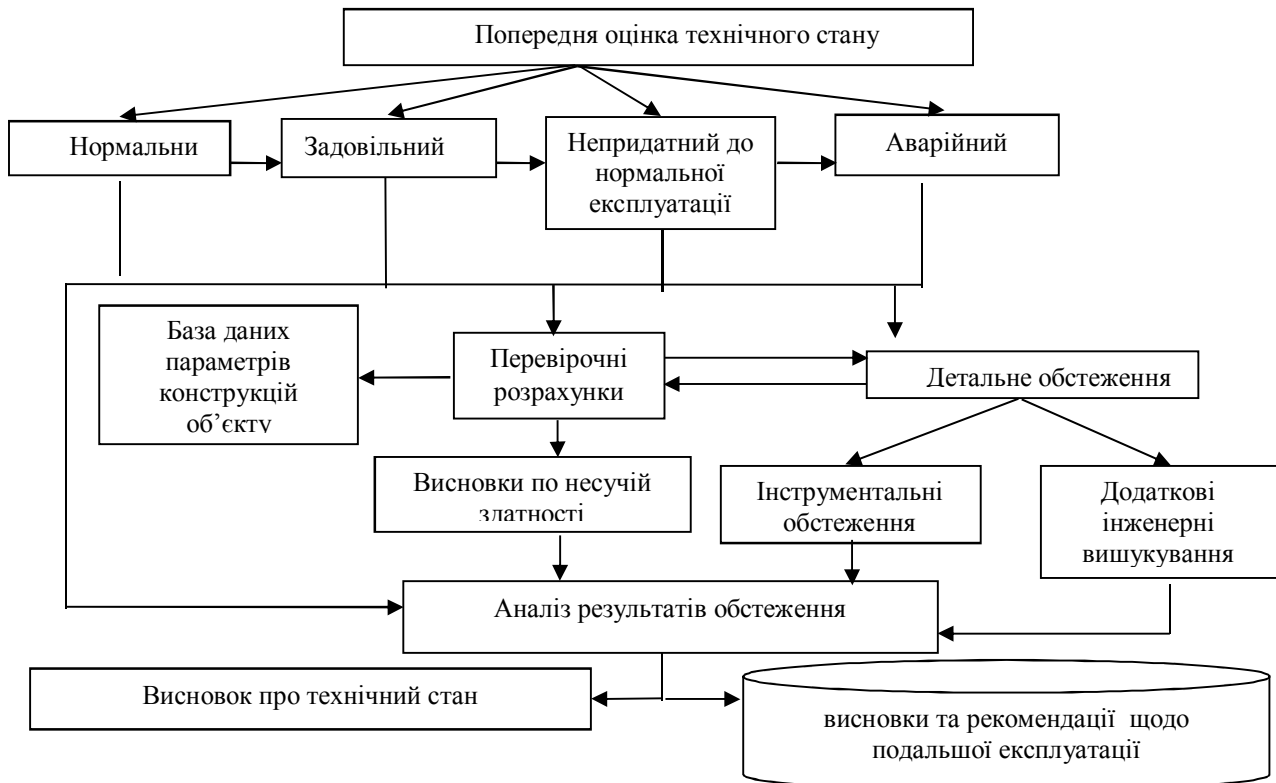


Рис.1. Структурна схема оцінки технічного стану конструкцій /  
Structural model for assessment of technical state of the structure

ситуації зазвичай використовуються:

- статистичні дані щодо аварійності та надійності конструктивних елементів та конструктивних систем;
- логічні методи аналізу «дерев подій» або «дерев відмов»;
- експертна оцінка з урахуванням думки фахівців у цій галузі.

Аналіз наслідків включає оцінку впливів на людей, майно або навколишнє середовище. Для прогнозування наслідків необхідні моделі аварійних процесів, розуміння їх сутності і сутності використовуваних вражаючих факторів, так як потрібно оцінити фізичні ефекти небажаних подій.

Аналіз небезпек має справу з потенційними пошкоджуючими чинниками і потенційними аваріями або нещасними випадками та пов'язана з

з інших підсистем, тобто ієрархічна структура складної системи може складатися з підсистем різних рівнів, де підсистеми нижчих рівнів входять складовими частинами в підсистеми вищих рівнів. У свою чергу, підсистеми складаються з компонентів - частин системи, які розглядаються без подальшого поділу як єдине ціле. Будь яку будівлю варто розглядати як складну систему, що ієрархічно складається з багатьох підсистем [8].

На рис.2 надана схема можливих факторів, що виникають у процесі експлуатації будівлі та можуть призвести до виникнення аварійної ситуації.

При проектуванні споруд слід прагнути до того, щоб всі елементи споруди були рівно надійні, тобто такими, при яких надійність окремих елементів, вузлів їх сполучень оцінювалася б приблизно рівними кількісними характеристиками.

Окремі аварійні ситуації і види відмов елементів дозволяють визначити їх вплив на інші прилеглі елементи і систему в цілому [9,10,12]. Причинно-наслідковий аналіз відмов конструктивної системи висотного будинку здійснюють у наступному порядку:

1) При аналізі конструктивної системи, перш за все, враховується сукупність впливів, що призводять до аварійної ситуації. По ступеню дії впливи

Кожен з цих елементів має свій критерій важливості, свою категорію відповідальності, згідно з нормативними документами [3, 11, 13].

Аварійна ситуація [2] призводить до повної або часткової відмови конструктивного елемента або системи в цілому. Для оцінки наслідків виникнення аварійної ситуації (відмови) в конструктивному елементі враховується критерій важливості елемента в системі та враховується його розташування.



Рис.2. Структурна схема можливих факторів, що можуть призвести до аварійної ситуації / Structural model for possible factors that may cause emergency situation

класифікуються як регламентовані і нерегламентовані. До регламентованих впливів відносяться параметричні відмови, що виникають в нормальних умовах експлуатації в результаті природних процесів старіння, зносу, корозування і т. д. До нерегламентованих впливів відносяться раптові катастрофічні відмови, що виникають в результаті зовнішніх впливів, що перевищують межі стійкості будівельних об'єктів, наприклад сейсмічний вплив, вибух, удар та інші форс-мажорні фактори.

2) Конструктивна система (об'єкт) складається з конструктивних елементів. Несучий каркас об'єкта – це складна конструкція, що представляє собою організовану сукупність груп уніфікованих конструктивних елементів, таких як основа, фундамент, колони, пілони, стіни, перекриття і т. д.

Наприклад, відмова колони першого поверху веде до переростання аварійної ситуації в аварію, а відмова колони середнього поверху при правильному проектуванні веде до перерозподілу зусиль в конструктивній системі.

3) Згідно з нормативними документами [11] призначаються різні рівні надійності, конструктивним елементам або всьому каркасу. При цьому під стандартним рівнем надійності уніфікованих груп несучих конструкцій слід розуміти такий рівень надійності, при якому ризик аварії стає стандартним: нормальним або гранично-допустимим. До нормального рівня надійності відноситься рівень  $P_i$ , при якому забезпечується нормальний (природний)  $R_i$  ризик аварії об'єкта, а до гранично-допустимого – рівень  $P_j$ , який відповідає гранично-допустимому значенню  $R_j$  ризику аварії.

Відповідно, до нормального ризику аварії об'єкта приводять параметричні впливи, а до гранично-допустимого приводять раптові нерегламентовані впливи [2, 4, 14]. Тому при проектуванні необхідно розробляти попереджувальні заходи для забезпечення безпеки об'єкта на протязі заданого періоду часу при виникненні аварійної ситуації.

4) В якості запобіжних заходів забезпечення безпеки об'єкту необхідно виконувати розрахунок на стійкість і розрахунок з урахуванням нелінійності. Розрахунок з урахуванням нелінійності виконується для виявлення критичного навантаження в елементі, що потенційно зазнає аварійного впливу. Якщо критичне навантаження в елементі виникає, необхідно проаналізувати роботу конструктивної системи в цілому, з врахуванням виключення з

роботи цього елемента і оцінити ймовірність пристосовуваності конструктивної системи до нововиниклих умов роботи. За результатами цього розрахунку слід виявити перерозподіл зусиль, який виникає після видалення елемента, якщо перерозподілу не відбулося, то може виникнути аварійна ситуація, яка може призвести до аварії великої ділянки або всього об'єкта. Для запобігання цієї ситуації рекомендується вжити проектні заходи щодо вдосконалення конструктивної системи в цілому, з урахуванням взаємовпливу конструктивних елементів. На рис. 3 наведений алгоритм дослідження відмов на прикладі висотної будівлі [7].

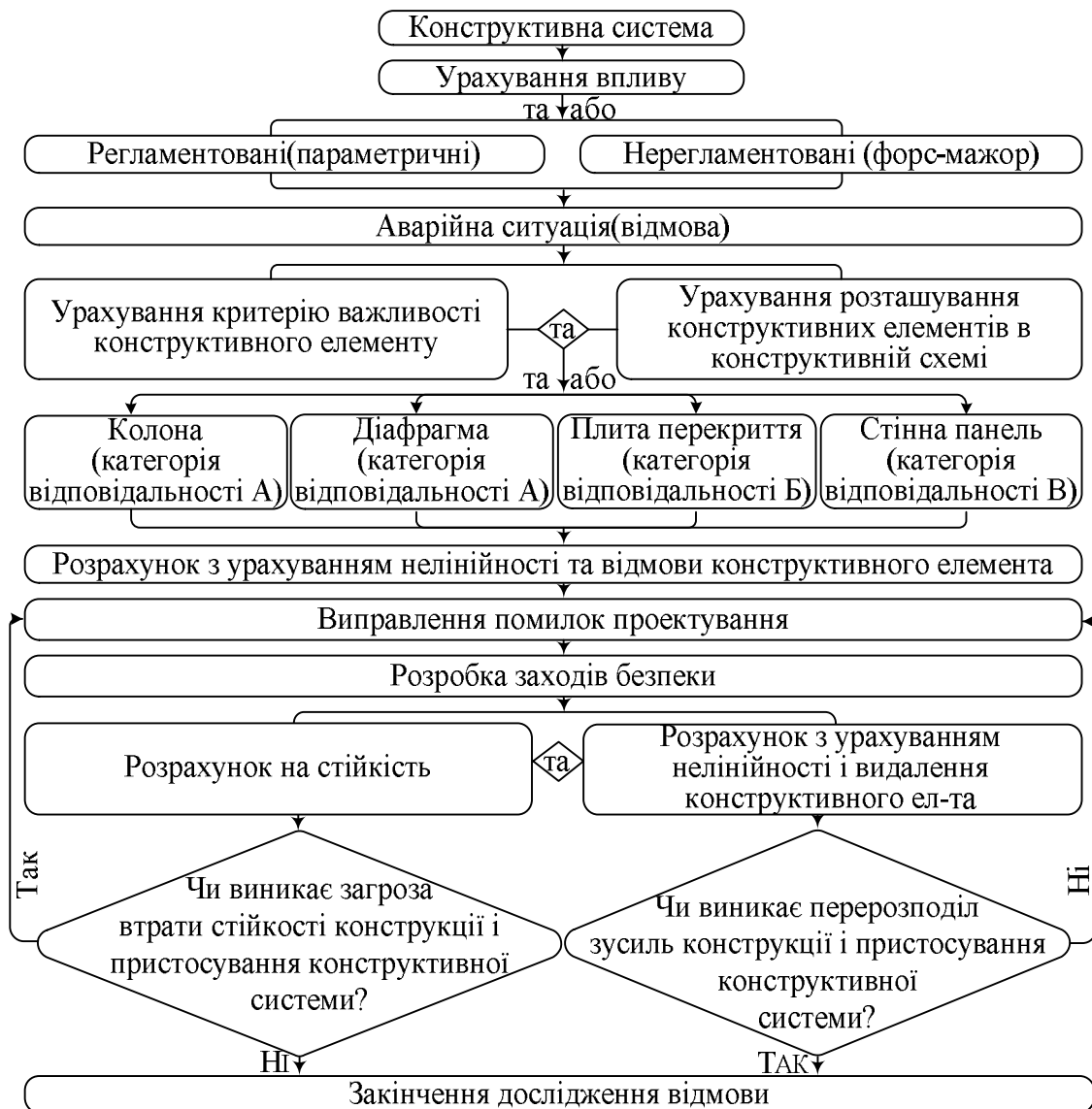


Рис. 3. Алгоритм причинно-наслідкового аналізу відмов для конструктивної системи / Algorithm for cause-and-effect analysis of refuses for structural system



При проектуванні споруд, що представляють систему окремих елементів, необхідно оцінити її надійність і довговічність за відомим законам розподілу надійності і довговічності цих елементів. ступінь надійності системи залежить від того, як взаємодіють між собою складові її елементи.

Логічний аналіз внутрішньої структури системи і визначення ймовірності небажаних подій  $E$  як функції окремих подій  $E_i$  є однією з задач аналізу небезпек.

Через  $P\{E_i\}$  будемо позначати ймовірність небажаної події  $E_i$ . (1)

Для повної групи подій  $n$ :

$$\sum_{i=1}^n \{E_i\} = 1. \quad (1)$$

Для рівно можливих подій:

$$(P \{E_i\} = p, i = 1, 2, \dots, n), \quad (2)$$

що утворюють певну групу подій, ймовірність дорівнює  $p = 1/n$ .

Протилежні події  $E_i$  і  $(-E_i)$  утворюють повну групу, тому:

$$P \{E\} = 1 - P \{-E\}. \quad (3)$$

На практиці користуються формулою об'єктивної ймовірності:

$$P \{E\} = n_E/n, \quad (4)$$

де  $n$  і  $n_E$  – загальне число випадків і число випадків, при яких настає подія  $E$ .

Ймовірність події  $E_1$  за умови  $E_2$  позначають  $P\{E_1|E_2\}$ .

Якщо події  $E_1$  і  $E_2$  незалежні, тобто якщо

$$P\{E_1|E_2\} = P\{E_1\} \text{ и } P\{E_2|E_1\} = P\{E_2\}, \quad (5)$$

то

$$P\{E_1|E_2\} = P\{E_1\} \times P\{E_2\}. \quad (6)$$

При  $n$  незалежних подіях  $E, E, \dots, E_n$  отримаємо

$$P\{\prod_{i=1,n} E_i\} = \prod_{i=1}^n \{E_i\} \quad (7)$$

Для компонентів системи та системи в цілому:

$$P_i = P\{E_i\}; q = P\{-E_i\} = 1 - p_i; p = P\{E\}; \quad (8)$$

$$q = P\{-E\} = 1 - p. \quad (9)$$

Логічна функція системи має вигляд

$$E = F(E_1, E_2, \dots, E_n). \quad (10)$$

Застосовуючи правила теорії ймовірностей, знаходять ймовірність небажаної події у вигляді функції небезпеки  $p = F_p(p_1, p_2, \dots, p_n)$ .

Підсистемою «АБО» називають частину системи, компоненти якої з'єднані послідовно. До небажаної події в такий підсистемі призводить відмова будь якого компонента підсистеми. Якщо  $E_i$  є відмова  $j$ -го компонента, то відмова підсистеми «АБО» є подія:

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_m = \sum_{j=1}^m E_j \quad (11)$$

де  $m$  – число компонентів.

Як приклад системи з послідовними з'єднаннями елементів найчастіше називають статично визначну конструкцію, в якій відмова одного елементу веде до відмови системи в цілому. Мова йде про відмови типу руйнування елементів. Чим більше число елементів входить в систему, тим нижче безвідмовність системи.

Якщо відмови компонентів взаємно незалежні, то ймовірність відмови в підсистемі «АБО»:

$$P\{\sum_{j=1}^m E_j\} = 1 - P\{\prod_{j=1}^m (-E_j)\} = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - P\{E_j\}). \quad (12)$$

Для рівно можливих відмов ймовірність відмови в цій підсистемі:

$$P\{E\} = 1 - (1 - p)^m. \quad (13)$$

Цей вираз свідчить про високу ймовірність відмови у випадку складних систем. Наприклад, при ймовірності відмови компонента  $p = 0,1$  підсистема «АБО», складається з 10 компонентів ( $m = 10$ ), має ймовірність того, що відмови у підсистемі не відбудеться, дорівнює:

$$(1 - p)^m = 1 - P\{E\} = (1 - 0,1)^{10} \approx 0,348 \approx 0,35. \quad (14)$$

Підсистемою «ТА» називають ту частину системи, компоненти якої з'єднані паралельно. При паралельному з'єднанні безвідмовність системи може підвищувати надійність окремих елементів. До відмови такої підсистеми призводить відмова всіх її компонентів:

$$E = E_1 * E_2 * \dots * E_m = \prod_{j=1,m} E_j. \quad (15)$$

Якщо відмови компонентів можна вважати взаємно незалежними, то ймовірність відмови у підсистемі «ТА»:

$$P\{E\} = \prod_{j=1,m} \{E_j\}. \quad (16)$$

Паралельно з'єднані компоненти  $E_i (i = 1, 2, \dots, m)$ , що утворюють підсистему «ТА», являють собою підсистеми «АБО», що складаються з послідовно з'єднаних компонентів  $E_j (j = 1, 2, \dots, n)$ . Ймовірність відмови  $i$ -ї підсистеми «АБО»:

$$P\{E_i\} = 1 - \prod_{j=1,n} (1 - P\{E_{ij}\}) \quad (17)$$

З урахуванням співвідношення для ймовірності підсистеми «ТА» знаходимо ймовірність відмови підсистеми «ТА - АБО»:

$$P\{E\} = \prod_{i=1}^m [1 - \prod_{j=1}^n (1 - P\{E_{ij}\})]. \quad (18)$$

Підсистемою «АБО - ТА» в системі називають підсистеми «ТА», з'єднані в підсистему «АБО».

Послідовно з'єднані компоненти  $E_i (i = 1, 2, \dots, m)$ , що утворюють підсистему «АБО», являють собою підсистеми «ТА» з паралельно з'єднаних компонентів  $E_j (j = 1, 2, \dots, n)$ . Ймовірність відмови  $i$ -ї підсистеми «ТА»:

$$P\{E_i\} = \prod_{j=1}^n P\{E_{ij}\}. \quad (19)$$

Використовуючи співвідношення для ймовірності підсистеми «АБО», знаходимо ймовірність відмови підсистеми «АБО - ТА»:

$$P\{E\} = 1 - \prod_{i=1}^m [1 - \prod_{j=1}^n P\{E_{ij}\}]. \quad (20)$$

Зазвичай при оцінці ризику його характеризують двома величинами – ймовірністю події  $P$  і наслідками  $X$ , які у вираженні математичного очікування виступають як співмножники  $R = PX$ .

По відношенню до джерел небезпек оцінка ризику передбачає розмежування нормального режиму роботи  $R_n$  і аварійних ситуацій  $R_{ав}$ :

$$R = R_n + R_{ав} = P_n \cdot X_n + P_{ав} \cdot X_{ав}. \quad (21)$$

У разі, коли наслідки невідомі, то під ризиком розуміють ймовірність настання певного поєднання небажаних подій:

$$R = \sum_{i=1}^n P_i. \quad (22)$$

Техногенний ризик оцінюють за формулою, що включає як ймовірність небажаної події, так і величину наслідків у вигляді збитків  $U$ :

$$R = P \times U \quad (23)$$

Якщо кожній небажаній події, що відбувається з ймовірністю  $P_i$ , відповідає збиток  $U_i$ , то величина ризику буде являти собою очікувану величину збитку  $U^*$ :

$$R = U^* = \sum_{i=1}^n P_i U_i. \quad (24)$$

Якщо всі ймовірності настання небажаної події однакові ( $P_i = P, i = 1, n$ ), то витікає:

#### ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. *Акимов В. А.* Основы анализа и управления риском в природной и техногенной сферах / В. А. Акимов, В. В. Лесных, Н. Н. Радаев. – М.: Деловой экспресс, 2004. – 352 с.  
*V.Akimov.* Basic aspects of analysis and management of risk in natural and technogenic areas / V.Akimov, V.Lesnykh, N.Radaev. – М.: Delovoy express, 2004. – 352 p.
2. *Алмазов В. О.* Аварии и мониторинг. Методическое пособие для проектировщиков и строителей / Владлен Ованесович Алмазов. – М.: МГСУ, 2008. – 31 с.  
*V.Almazov.* Accidents and monitoring. The guidelines for designers and builders / V.Almazov. – М.: MGSU, 2008. – 31 p.
3. *Барабаш М. С.* Аналіз надійності висотної будівлі з урахуванням ризику прогресуючого обвалення / М. С. Барабаш, К. М. Мисливець // Науково-виробничий журнал: Будівництво України. – 2010. – № 5 – С. 37–41.  
*M.Barabash.* Analysis of reliability of high-rise building with account of risk of progressive damage / M.Barabash, K.Myslyvets // Research journal: Budivnytstvo Ukrainy. – 2010. – № 5 – p. 37–41.
4. *Барабаш М. С.* Исследование вопросов живучести строительных конструкций при

$$R = P \sum_{i=1}^n U_i \quad (25)$$

#### Результати

Розроблені алгоритми дослідження відмов конструктивних елементів і конструктивних систем та запропонована методика визначення ризику аварії. Запропоновано запобіжні заходи забезпечення безпеки будівельного об'єкту.

#### Наукова новизна та практична значимість

Удосконалена методика визначення ризику аварії конструктивних елементів і конструктивних систем на основі методів статистичного моделювання. За допомогою запропонованої методики можливо визначити чисельну оцінку ризику надзвичайної події в будівлі, що складається з системи конструктивних елементів з незалежними рівно можливими відмовами на будь-якому етапі експлуатації конструкції.

#### Висновки

Згідно запропонованому логіко-ймовірнісному методу можливо визначити величину ризику при виникненні надзвичайної ситуації з рівно можливими відмовами конструктивних елементів в конструктивній системі, як очікувану величину збитку.

аварийных воздействиях / М. С. Барабаш, А. С. Городецкий // Строительство, материаловедение, машиностроение // Сб. научн. тр. – Дн-вск: ПГАСА, 2010. – № 56. – С.123–128.

*M.Barabash.* Research on survivability of building structures in emergency situations / M.Barabash, A.Gorodetsky // Construction, material science, mechanical engineering // Collection of research papers – Dnepropetrovsk: PSACEA, 2010. – № 56. – p.123–128.

5. *Барабаш М. С.* Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла объектов строительства: Монография / Мария Сергеевна Барабаш. – К.: Изд-во «Сталь», 2014. – 301 с.

*M.Barabash.* Computer simulation of life cycle in building objects: Monograph / M.Barabash. – К.: 'Stal' Publ., 2014. – 301 p

6. *Барабаш М. С.* Методи мінімізації ймовірності прогресуючого руйнування висотної будівлі при дії сейсмічних навантажень / М. С. Барабаш, Ю. В. Гензерський, Я. В. Покотило // Науково-технічний журнал: Нові технології в будівництві. – 2011. – № 1 (21). – С.17–23.

*M.Barabash.* Methods for minimizing of probability of progressive damage in high-rise building during earthquake load / M.Barabash, Y.Genzersky, Y.Pokotilo // scientific journal: New technologies in construction. – 2011. – № 1 (21). – p.17–23.

7. *Барабаш М. С.* Обеспечение конструктивной безопасности при проектировании высотных зданий с использованием ПК ЛИРА-САПР / М. С. Барабаш, М. А. Ромашкина // Перспективы развития

программных комплексов для расчета несущих систем зданий и сооружений // Сб. науч. тр. Международного научного семинара 19–20 сентября 2013 г. – Курск, 2013. – С. 73–83.

*M.Barabash.* Providing structural safety for design of high-rise buildings with LIRA-SAPR software / M.Barabash, M.Romashkina // Development prospects for software packages for analysis of bearing systems of buildings and structures // Collection of research papers, International scientific seminar, September 19–20, 2013 – Kursk, 2013. – p. 73–83.

8. *Ветошкин А. Г.* Надежность технических систем и техногенный риск / Александр Григорьевич Ветошкин. – Пенза: Изд-во ПГУАиС, 2003. – 154 с.

*A.Vetoshkin.* Reliability of technical systems and technogenic risk / A.Vetoshkin. – Penza: PGUAS Publ., 2003. – 154 p.

9. *Добромыслов А. Н.* Ошибки проектирования строительных конструкций: научное издание/ Андрей Николаевич Добромыслов – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007. – 184 с.

*A.Dobromyslov.* Errors in design of building structures: scientific ed. / A.Dobromyslov – M.: Publ. Association of construction institutes, 2007. – 184 p.

10. *Живучесть* зданий и сооружений при запроектных воздействиях: [научное издание]/ В. И.Колчунов, Н. В.Клюева, Н. Б. Андросова, А. С. Бухтиярова. – М.: Издательство АСВ, 2014.-208 с.

*Survivability* of buildings and structures in beyond-design loads: [scientific ed.]/ V.Kolchunov, N.Klyueva, N.Androsova, A.Bukhtiyarova. – M.: ACB Publ., 2014.-208 p.

11. *Загальні* принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ: ДБН В.1.2-14-2009. – [Введено в дію з 01-12-2009]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 45 с. (Державні будівельні норми України).

*General principles for providing reliability and structural safety of buildings, structures and foundations: DBN V.1.2-14-2009.* – [Valid from 01-12-2009]. – K.:

Minregionbud of Ukraine, 2009. – 45 p. (building code of Ukraine).

12. *Клованич С.Ф.* Надежность и долговечность сооружений: Учебный курс / Сергей Федорович Клованич. – Одеса: ОГАСА – 2001. – 30 с.

*S.Klovanich.* Safety and durability of structures: Study course / S.Klovanich. – Odessa: OGASA – 2001. – 30 p.

13. *Коргина М. А.* Оценка напряженно-деформированного состояния несущих конструкций зданий и сооружений в ходе мониторинга их технического состояния : дис. ... кандидата техн. наук : 05.23.01 / Коргина Мария Андреевна. – М., 2008. – 225 с.

*M.Korgina.* Evaluation of stress strain state of load-bearing structures in buildings during monitoring of their technical state: PhD dis. ... : 05.23.01 / M.Korgina. – M., 2008. – 225 p.

14. *Мельчаков А. П.* О формате технического регламента на величину риска аварии зданий и сооружений / А. П. Мельчаков, А. Г. Васильев, М. В. Косогорова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2007. – № 22. – С. 29–33.

*A.Melchakov.* About format of technical regulation by the amount of risk of accident of buildings and structures / A.Melchakov, A.Vasiljev, M.Kosogorova // Vestnik of South Ural State University. Series 'Construction and architecture'. – 2007. – № 22. – p. 29–33.

15. *Перельмутер А.В.* Избранные проблемы безопасности и надежности строительных конструкций / Анатолий Викторович Перельмутер. – М.: Издательство АСВ, 2007. – 254 с.

*A.Perelmuter.* Selected problems of safety and reliability of building structures / A.Perelmuter. – M.: ACB Publ., 2007. – 254 p.

16. *Izzudin B.A., Vlassis A.G., Elghazouli A.Y., Nethercot D.A.* Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss, Part I, Engineering structures 20 (2008), 1308-1318; part II, Engineering structures 30 (2008). – P. 1424–1438.

17. *Marchand K. A.* Blastand Progressive Collapse / Kirk A. Marchand, Farid Alfawakhive. – AISC, 2005.

Статья поступила в редколлегию 06.08.2015