

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Одеська державна академія будівництва та архітектури

**БАРАБАШ МАРІЯ СЕРГІЇВНА**



УДК 624.074:624.046.2:624.046.5

**ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ  
КОНСТРУКЦІЙ З УРАХУВАННЯМ СТАДІЙ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ  
БУДІВЕЛЬ І СПОРУД**

Спеціальність 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному авіаційному університеті Міністерства освіти і науки України

**Науковий консультант:**

доктор технічних наук, професор  
**Городецький Олександр Сергійович**,  
Національний авіаційний університет, професор кафедри комп'ютерних технологій будівництва (м. Київ)

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Савицький Микола Васильович**,  
ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», проректор з наукової роботи, завідувач кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій (м. Дніпропетровськ);

доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Бамбура Андрій Миколайович**,  
Державне підприємство «Науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», завідувач відділу надійності конструкцій (м. Київ);

доктор технічних наук, професор  
**Єгупов Костянтин Вячеславович**,  
Одеська державна академія будівництва та архітектури, завідувач кафедри енергетичного та водогосподарського будівництва (м. Одеса)

Захист відбудеться «26» листопада 2014 р. о 13<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д41.085.01 при Одеській державній академії будівництва та архітектури за адресою: 65029, Україна, м. Одеса, ул. Дідріхсона, 4

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеської державної академії будівництва та архітектури за адресою: 65029, Україна, м. Одеса, ул. Дідріхсона, 4

Автореферат розісланий « 23» жовтня 2014 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
к.т.н., доцент



О. О. Попов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Чисельне моделювання є одним з основних напрямків проектування конструкцій, причому, важливе значення приймає чисельне моделювання процесів життєвого циклу, пов'язаних із зміною напружено-деформованого стану (НДС) на всіх стадіях існування будівельного об'єкта.

Необхідність чисельного аналізу конструкцій будівель і споруд диктується ускладненням конструктивних рішень та умов експлуатації (багатовимірність, комплексність і багатофункціональність будівель і споруд, їх габарити, виняткова складність безперервного моніторингу технічного стану, неможливість їх ремонту без повного виключення навантажень, зміна об'ємно-планувальних рішень і режимів навантаження в ході експлуатації); унікальністю (грунтові, кліматичні та інші зовнішні умови, складність і тривалість зведення та експлуатації, підвищена роль «людського фактора» на всіх стадіях життєвого циклу); а також неповнотою і невизначеністю вихідних даних (по геометрії, жорсткості, початковим умовам, навантаженням і впливам, несучій здатності конструкцій).

Між тим, не всі фактори враховуються в існуючих нормативних документах, і в практиці проектування та будівництва, що може призвести до виникнення аварійної ситуації. Існуючі підходи при проектуванні та моніторингу наявних будівель, як правило, орієнтовані на певну стадію життєвого циклу і не враховують історії, яка зв'язує всі стадії життєвого циклу. Таким чином, створення технології проектування, що відстежує зміну НДС конструкцій на всіх стадіях життєвого циклу, і яка враховує на кожній наступній стадії стан конструкції на попередній стадії є актуальною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема дисертаційної роботи відповідає актуальним напрямкам науково-технічної політики України у відповідності з Постановою Кабінету Міністрів України: № 156 від 25 лютого 2009 р. «Про затвердження Державної цільової соціальної програми розвитку цивільного захисту на 2009-2013 роки», та наказами Міністерства регіонального розвитку та будівництва України № 549 та 552 від 27.12.2010 «Про прийняття національних стандартів щодо проектування будівельних конструкцій, гармонізованих з європейськими стандартами групи А (Єврокоди)». Також при підготовці дисертаційної роботи дослідження були проведені з пріоритетних наукових напрямів «Методи розрахунку і дослідження напружено-деформованого стану, у тому числі при наявності дефектів різного походження», «Науково обґрунтовані методи оцінки технічного стану та залишкового ресурсу конструкцій тривалої експлуатації» і «Динаміка, стійкість і оптимізація взаємодіючих дискретно-континуальних механічних систем», визначеними наказом Міністерства освіти і науки України та Національної Академії наук України від 26.11.2009 р № 1066/609 «Основні наукові напрями та найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних і гуманітарних наук на 2009-2013 рр.».

Дослідження виконувалися у рамках держбюджетних тем Національного авіаційного університету № 6/10.01.02 «Новітні технології проектування залізобетонних конструкцій, що зводяться та експлуатуються в складних інженерно-геологічних умовах» (2010–2015 рр.) (відповідальний виконавець); науково-дослідна робота № 6/10.01.02 «Комп'ютерне моделювання процесів життєвого циклу об'єктів

промислового, цивільного та транспортного будівництва» (2012-2015 рр.) (відповідальний виконавець).

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є вирішення проблеми створення комплексу науково-обґрунтованих методів чисельного моделювання напружено-деформованого стану конструкцій протягом стадій їх життєвого циклу і на основі розвитку методів розрахунку конструкцій з урахуванням нелінійного деформування.

В процесі реалізації сформульованої проблеми були поставлені і вирішені наступні взаємопов'язані задачі:

- аналіз методів, що застосовуються для оцінки несучої здатності і деформативності будівель і споруд на всіх стадіях їх життєвого циклу;

- формулювання науково-обґрунтованої концепції проектування будівель і споруд на основі чисельних моделей будівель, споруд та процесів, що відбуваються в конструкціях при дії навантажень і впливів на протязі їх життєвого циклу;

- узагальнення аналітичних залежностей для визначення адекватних параметрів конструктивних систем при інтеграції на стадії проектування і розробка моделей для розрахунку і проектування будівель і споруд з урахуванням процесів життєвого циклу;

- обґрунтування впливу процесу зведення і реологічних процесів на напружено-деформований стан конструкцій будівель і споруд та концепцій необхідності врахування зміни НДС на стадіях життєвого циклу (ЖЦ) при проектуванні;

- розробка нового методу врахування нелінійних властивостей матеріалу при проектуванні та удосконалення існуючих методів нелінійного аналізу і проектування складних просторових конструктивних систем;

- розробка комплексу методів, що дозволяють оцінити НДС по мірі постадійного збільшення навантаження і забезпечують живучість і пристосовуваність конструкцій на всіх стадіях життєвого циклу, включаючи і аварійні ситуації;

- розробка і реалізація ефективних алгоритмів і програмного забезпечення для аналізу станів складних просторових систем при силових і деформаційних навантаженнях з урахуванням процесу зведення, з урахуванням процесу повзучості бетону на стадії зведення і на стадії експлуатації, з урахуванням процесу пристосовуваності конструкцій при аварійних ситуаціях;

- створення модулів програмного комплексу ЛІРА-САПР, що дозволяють виконувати моделювання процесів життєвого циклу будівель і споруд з урахуванням нелінійної роботи несучих конструктивних елементів і відображати їх реальний напружено-деформований стан;

- розробка методів визначення ймовірності руйнування конструктивних елементів і конструктивних систем з використанням принципів кваліметрії;

- розробка нової технології розрахунку конструкцій та рекомендацій по проектуванню будівель і споруд з урахуванням зміни НДС на стадіях їх життєвого циклу та їх впровадження в будівельній галузі України та країн СНД.

**Об'єкт дослідження.** Конструкції будівель і споруд на всіх стадіях життєвого циклу.

**Предмет дослідження.** Напружено-деформований стан конструкцій будівель і споруд.

**Гіпотеза дослідження.** Полягає в представленні, що чисельне моделювання процесів, що відбуваються на протязі часу, (процес навантаження, процес зведення, реологічні процеси, процеси пристосовності конструкцій), дозволяє визначити НДС конструкцій на всіх стадіях життєвого циклу.

**Методи дослідження:** теоретичні методи будівельної механіки; методи математичного моделювання напружено-деформованого стану несучих конструкцій; методи теорії пружності та механіки деформованого твердого тіла для оцінки реального НДС; чисельні методи – метод скінченних елементів (МСЕ); методи математичної статистики та теорії ймовірностей при аналізі результатів моніторингу; метод імітаційного моделювання Монте-Карло; методи теорії надійності для дослідження безвідмовної роботи конструкцій на стадії зведення та експлуатації.

**Наукова новизна** отриманих результатів полягає в тому, що автором отримані нові науково обґрунтовані результати, спрямовані на створення методів моделювання та розрахунку висотних будівель і споруд з урахуванням реальної роботи конструкцій на всіх стадіях життєвого циклу. Наукова новизна полягає в наступному:

- вперше сформульовані і обґрунтовані наукові положення, сукупність яких можна кваліфікувати як новий перспективний напрямок моделювання конструкцій будівель і споруд з урахуванням зміни НДС на кожній стадії життєвого циклу;

- розроблено нову технологію моделювання та розрахунку будівель і споруд з урахуванням реальної роботи конструкцій на всіх стадіях життєвого циклу, що враховує зміну НДС, реологічні властивості матеріалів і аварійні ситуації;

- обґрунтовано концепцію проектування будівель і споруд на основі математичних моделей нелінійної роботи конструкцій, розроблені співвідношення для реалізації особливостей процесу навантаження конструктивно та фізично нелінійних систем конструкцій;

- розроблено метод розрахунку конструкцій – «метод диференційних жорсткостей», що дозволяє диференційовано враховувати розподіл характеристик жорсткості по області конструктивних елементів, зумовлену фізичною нелінійністю матеріалу;

- розроблено новий метод «послідовних жорсткостей», що дозволяє моделювати реологічні властивості залізобетону на експлуатаційній стадії;

- запропоновані концепції чисельного моделювання процесів життєвого циклу: процесу зведення, процесу навантажування з урахуванням розвитку тріщин, процесу поведінки конструкції в часі з урахуванням реологічних властивостей матеріалу, процесу пристосовуваності конструкцій при запроектованих впливах;

- вдосконалено методи визначення теоретичної та фактичної ймовірності руйнування конструктивних елементів і конструктивних систем на основі методів статистичного моделювання.

Всі представлені в дисертаційній роботі результати отримані здобувачем самостійно.

**Практичне значення отриманих результатів.** Розроблений теоретичний

апарат, який реалізує основні закономірності нелінійного деформування конструкцій будівель і споруд, став основою розробки практичних алгоритмів і рекомендацій з проектування та розрахунку будівель і споруд:

- розроблений метод розрахунку конструкцій – «метод диференційних жорсткостей», дозволяє в практичних розрахунках на стадії проектування враховувати фізичну нелінійність матеріалу;

- розроблено рекомендації по проектуванню конструктивних систем будівель і споруд з урахуванням пристосовності конструкцій до раптових запроектних впливів;

- розроблено рекомендації по проектуванню конструктивних систем будівель і споруд з урахуванням процесу зведення;

- розроблена методика моделювання конструктивних систем каркасно-монолітних будівель з урахуванням ефектів повзучості бетону.

Результати дисертаційної роботи реалізовані в нормативних документах України: ДБН В.2.2-24: 2009 «Проектування висотних житлових і цивільних будівель». Додаток Е. Методи розрахунку на прогресуюче руйнування; ДСТУ-Н Б.26-ХХ: 2014 «Застосування виробів з пористого бетону автоклавного твердіння», ДСТУ-Н Б В.2.6-ХХХ: 201Х «Настанова з проектування монолітних залізобетонних конструкцій будинків і споруд».

Методи та алгоритми реалізовані в програмних комплексах ЛПА-САПР (свідоцтво про державну реєстрацію авторських прав № 55503), САПФІР (свідоцтво про державну реєстрацію авторських прав № 55504), КАЛПСО (свідоцтво про державну реєстрацію авторських прав № 24931) які впроваджені в практику проектування в проектні організації України, а також країн ближнього і далекого зарубіжжя.

Отримані практичні результати досліджень забезпечили можливість застосування економічних і надійних проектно-конструкторських рішень для будівель і споруд та можуть бути теоретико-методологічним базисом учбових дисциплін та використовуватись в науково-дослідній роботі на кафедрах навчальних закладів України та країн СНД будівельного напрямку.

**Особистий внесок здобувача** полягає в наступному:

- обґрунтуванні необхідності врахування процесів в часі при розрахунку параметрів напружено-деформованого стану конструкцій будівель і споруд та врахування зміни НДС конструкцій на кожній стадії їх життєвого циклу вже на стадії проектування [2, 19, 42];

- узагальненні аналітичних залежностей для визначення адекватних параметрів конструктивних систем при інтеграції на стадії проектування [12, 13, 27, 31, 43];

- узагальненні методики розрахунку по міцності, жорсткості та тріщиностійкості конструкцій будівель і споруд з урахуванням нелінійної деформаційної теорії та реалізації в програмному комплексі ЛПА-САПР [3, 5, 6, 11, 17, 23, 35, 36, 38];

- розробці нового інженерного методу врахування нелінійних властивостей матеріалу при проектуванні на основі вдосконаленого методу січних [10, 40];

- встановленні закономірностей впливу на напружено-деформований стан

конструкцій історії навантаження в процесі зведення, історії тріщиноутворення на стадії експлуатації, та розробці комплексу методів, що дозволяють оцінити НДС конструкцій по мірі постадійного зростання навантаження, і забезпечують живучість та пристосовуваність конструкцій на всіх стадіях життєвого циклу, включаючи аварійні ситуації [1, 4, 14, 15, 22, 30, 40];

– розробці та реалізації ефективних алгоритмів і програмного забезпечення для аналізу станів складних просторових систем при силових і деформаційних навантаженнях з урахуванням процесу зведення, процесу повзучості бетону на стадії зведення та на стадії експлуатації, процесу пристосовуваності конструкцій при аварійних ситуаціях [2, 21, 30, 32].

– розробці нової технології моделювання конструкцій будівель і споруд [2, 19].

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідалися й одержали позитивну оцінку на конференціях і наукових семінарах: на VI-XI Міжнародних науково-технічних конференціях «АВІА 2004 – АВІА 2013» (м. Київ, 2004-2013 рр.); на науковому семінарі-колоквіумі «Вдосконалення методів розрахунку, конструювання, будівництва, експлуатації та ремонту висотних будівель» (м. Київ, 2005 р.); на науково-практичному семінарі «Перспективні напрямки проектування житлових та громадських будівель» (м. Київ 2006 р.); на IV-XI Міжнародних науково-практичних конференціях «Інноваційні технології життєвого циклу об'єктів житлово-цивільного, промислового і транспортного призначення» (м. Ялта, 2006-2013 рр.); Міжнародних науково-практичних семінарах «Нове в будівельному проектуванні» (м. Москва, Російська Федерація, 2008-2010 рр.); на Міжнародних науково-практичних конференціях «Архітектура та екологія. Проблеми міського середовища» (м. Київ 15-16 листопада 2011 р., 2012 р.); на V Міжнародній науково-технічній конференції «Комп'ютерні технології в будівництві» (м. Київ-м. Севастополь, 18-21 вересня 2007 р.); на 9-й Всеукраїнській науково-технічній конференції «Будівництво в сейсмічних районах України» (м. Ялта, 2012 р.); на I, II Міжнародній науковій конференції «Задачі та методи комп'ютерного моделювання конструкцій і споруд» («Золотівські читання») (м. Москва, МДБУ, Російська Федерація, 2012, 2013 р.); на IV, V Міжнародних симпозіумах «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» (м. Челябінськ, Російська Федерація, 19-22 червня 2012 р, м Іркутськ, Російська Федерація, 01-06 липня 2014 р.); на 16-й конференції «Наука – майбутнє Литви». Транспортне машинобудування та управління, (м. Вільнюс, Литва, 8 травня 2013р.); на Міжнародному науковому семінарі «Перспективи розвитку програмних комплексів для розрахунку несучих систем будівель і споруд» (м. Курськ, Російська Федерація 19-20 вересня 2013 р.); на Міжнародному науково-практичному конгресі «Міське середовище – XXI сторіччя – Архітектура. Будівництво. Дизайн» (м. Київ, 10-14 лютого 2014 р.); на другій Міжнародній науково-технічній конференції «Підвищення енергоефективності будівель і споруд – методологія, конструктивні принципи, ефективні конструкції, матеріали, обладнання» (м. Закопане, Польща, 02–07 березня 2014 р); на Міжнародній конференції Seismics-2014 “Seismic resistance and rehabilitation of buildings”, (м. Тбілісі, Грузія, 29–30 травня 2014 р.).

Робота розглядалася на міжкафедральному науковому семінарі Департаменту комп'ютерного проектування будівництва Грузинського технічного університету; на

пленарному засіданні Міжнародного симпозиуму «Актуальні проблеми комп'ютерного моделювання конструкцій і споруд» при участі Російської академії архітектурних і будівельних наук, на розширеному засіданні кафедр енергетичного та водного господарства, залізобетонних та кам'яних конструкцій, будівельних конструкцій, опору матеріалів Одеської державної академії будівництва та архітектури; розширеному науковому семінарі ДП Науково-дослідного інституту будівельних конструкцій.

**Публікації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи опубліковані в 43 наукових працях, в тому числі: 3 монографії (1 персональна, 2 – у співавторстві), 38 статтях, з яких 7 – в зарубіжних виданнях з індексом цитування, 15 – без співавторів. 31 стаття опублікована в наукових виданнях, рекомендованих ВАК України, 1 навчальний посібник з грифом МОН України.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота містить вступ, 6 розділів, висновки та результати впровадження, список використаних джерел (337 найменувань на 26 стор.). Крім того, вона містить список скорочень, позначень та термінів (на 5 стор.) та 1 додаток, в якому розміщені матеріали щодо практичного впровадження результатів роботи. Загальний обсяг основного тексту дисертації становить 348 сторінок, в тому числі 53 сторінки з рисунками і таблицями.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, наведена загальна характеристика роботи, сформульовані мета і задачі дослідження, надано відомості про наукову новизну і практичне значення результатів, показаний особистий внесок здобувача, надано інформацію про апробацію, структуру та об'єм дисертаційної роботи.

У **першому розділі** наведено класифікацію стадій життєвого циклу будівель і споруд. Обґрунтовуються методи чисельного моделювання будівель і споруд на різних стадіях життєвого циклу у зв'язку із змінюваним напружено-деформованим станом конструкцій. Визначення реального напружено-деформованого стану елементів несучих конструктивних систем стає можливим при проведенні ряду чисельних експериментів, що моделюють ті чи інші ситуації. Наведена структурно-логічна схема життєвого циклу будівельного об'єкта (рис.1).

Проведено аналіз конструктивних схем висотних і багатоповерхових будівель (як найбільш представницького для досліджень класу будівель) та виявлено особливості роботи їх несучих конструкцій. В результаті аналізу прийнятих підходів створення розрахункових схем виявлено, що жодна з розглянутих моделей розрахунку будівель не враховує всі значимі параметри для опису просторової роботи складних несучих систем, оскільки всі вони є спрощеними. Також відсутні методики врахування реальної спільної роботи конструкцій з урахуванням процесів життєвого циклу і фактора зміни НДС конструкцій в часі. Запропоновано методику врахування стадій життєвого циклу при моделюванні конструктивних систем будівлі, яка дозволяє перейти від спрощених ідеалізованих моделей до моделей, які враховують реальну роботу конструкцій, що дає можливість уникнути низки помилок. Методика базується на методі скінченних елементів (МСЕ), який охоплює широкий клас задач у будівельній механіці та механіці деформованого твердого тіла.



Застосуванню методу скінченних елементів і його розвитку присвячені роботи В.А. Баженова, Д.В. Вайнберга, А.С. Сахарова, О.С. Городецького, Ю.В. Верюжського, В.І. Гуляєва, М.О. Соловья, В.К. Цихановського, О.І. Гуляра, Є.С. Дехтярюка, В.М. Кислоокого та ін.

Теорії та практиці створення, моделювання, розрахунку, конструювання, дослідження несучої здатності будівельних конструкцій, особливостям формування розрахункових моделей присвячені роботи Т.Н. Азізова, В.А. Банаха, О.І. Білика, А.М. Бамбури, А.Я. Барашикова, О.І. Голоднова, О.С. Городецького, Є.В. Горохова, П.Ф. Дроздова, О.О. Диховічного, Л.Г. Дмитрієва, М.І. Карпенка, С.М. Карпенка, Є.В. Клименко, С.Ф. Клованіча, В.І. Колчунова, В.А. Пермькова, А.В. Перельмутера, С.Ф. Пічугіна, М.В. Савицького, О.В. Семка, А.В. Сильвестрова, В.І. Слівкєра, С.О. Слободянюка, Л.І. Стороженка, В.І. Травуша, А.В. Шимановського, В.С. Шмуклера, Е. Хог, К. Чой, R.L. Taylor, O.C. Hayes-Roth F., Maher M., Zienkiewicz, Waterman D.A. та ін.

Питання динамічних розрахунків будівель і споруд досліджені у роботах Я.М. Айзенберга, А.Н. Бірбраєра, В.С. Дорофєєва, В.К. Єгупова, К.В. Єгупова, Р. Клаф, В.В. Кулябко, М.Г. Марьєнкова, Дж. Пензієн, та ін., у тому числі на вітрові динамічні навантаження – М.І. Казакевича, Ю.П. Назарова, В.М. Острєцова, Е. Сіміу, Р. Сканлана, W.H. Melbourne та ін., на сейсмічні навантаження – Дж.Ф. Борджеса, В.К. Єгупова, К.В. Єгупова, Ю.І. Немчинова, С.Ю. Фіалко, T. Paulay, M.J.N. Priestley та ін.

Питанням розробки методів запобігання прогресуючому обваленню присвячені праці В.О. Алмазова, Мутока Кяло, О.І. Плотникова, Б.С. Расторгуєва, Г.И. Шапиро, В.В. Гурьєва, Ю.А. Эйсмана, зарубіжних вчених G. Powell, J.R. Gilmour і K.S. Viridi, G. Kaewkulchai і E.B. Williamson і A.J. Pretlove, M. Ramsden і A.G. Atkins, B.A. Izzudin, A.G. Vlassis, A.Y. Elghazouli, D.A. Nethercot та інших вчених. В роботах показано вплив динамічного ефекту при прогресуючому обваленні, який зменшується при збільшенні пластичних деформацій. Питання конструкційної безпеки і надійності висвітлені в роботах автора, а також у роботах О.С. Городецького, А.І. Лантух-Ляценка, А.В. Перельмутера, В.В. Болотіна, Ю.І. Кудишина, Н.В. Ключєвої, В.І. Колчунова, А.Г. Тамразяна та ін.

До основних проблем моделювання відносяться складність створення скінченно-елементної моделі, недостатність і проблематичність опису ймовірнісних процесів навантаження, недостатні знання про реологічні властивості матеріалу, особливості складного і циклічного навантаження та багато ін.

З розвитком чисельних методів, потужностей сучасних комп'ютерів і програмних комплексів новим етапом створення адекватних розрахункових моделей в архітектурно-будівельному проектуванні є чисельне моделювання на основі єдиної інформаційної моделі. Технологія створення єдиної інформаційної моделі дозволяє перетворити архітектурну модель будівлі в скінченно-елементну розрахункову модель, для подальшого аналізу її в розрахункових програмних комплексах.

В роботі запропоновано чисельні методи, що дозволяють здійснювати моделювання процесу всього життєвого циклу будівель і споруд, включаючи стадії зведення, реологічні процеси на стадії експлуатації, процес пристосовності конструктивної системи до змінюваних навантажень у разі аварійних ситуацій.

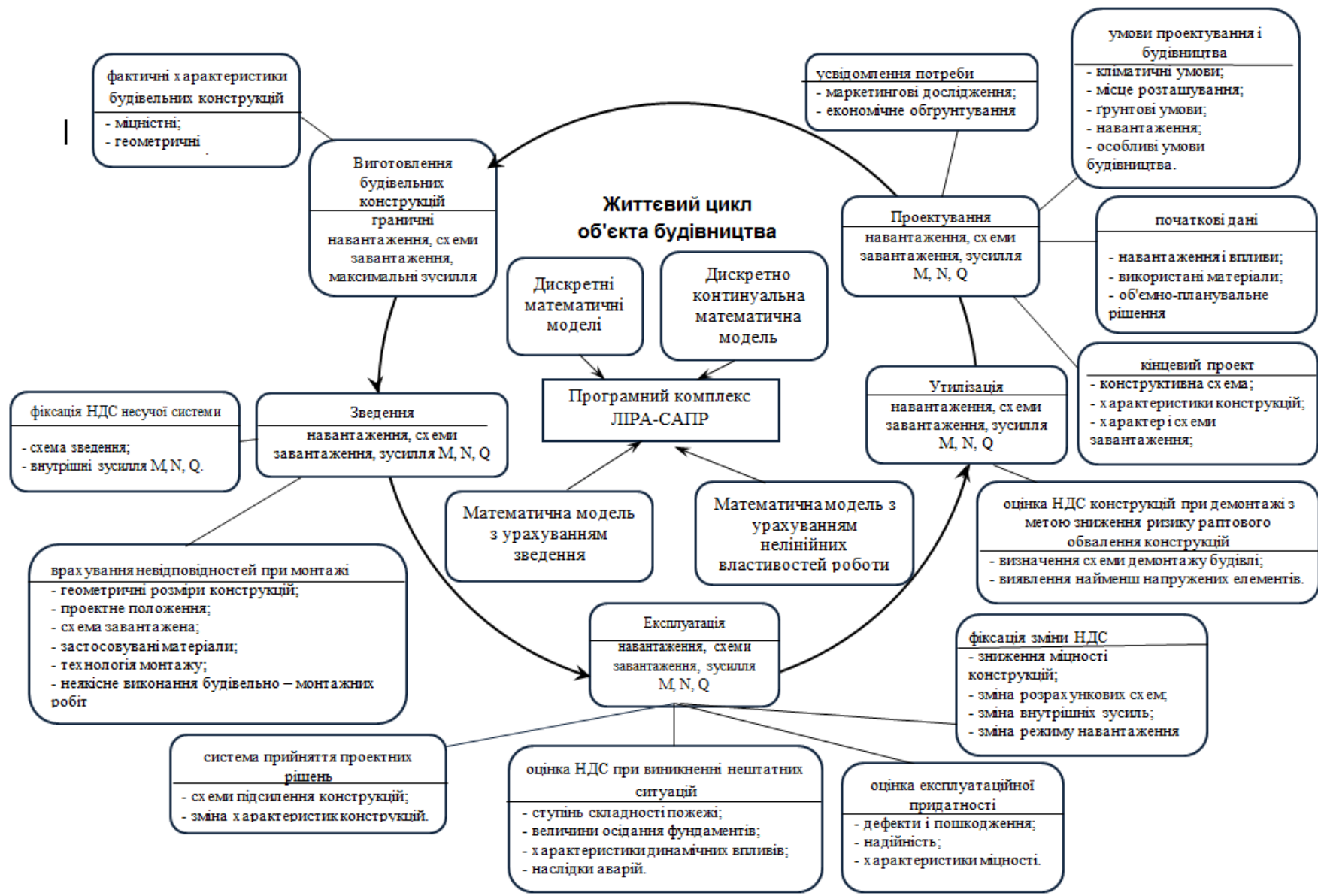


Рис. 1. Структурно-логічна схема життєвого циклу будівельного об'єкта

Оскільки, в даний час розрахунок конструктивної схеми будівлі з метою остаточного визначення НДС конструкцій виконується завжди з використанням програмних комплексів, заснованих на методі скінченних елементів, автором виконана чисельна реалізація методів і алгоритмів, пов'язаних з чисельним моделюванням, у програмному комплексі ЛПРА-САПР.

У **другому розділі** розроблено аналітичні та чисельно-аналітичні методи, що дозволяють на стадії проектування на основі чисельного моделювання отримати раціональні проектні рішення. Розроблено концепцію аналітичної моделі, яка передуює розрахунковій схемі. Технологія створення аналітичної моделі дозволяє виявити некоректності архітектурної моделі вже на ранніх стадіях проектування і максимально отримати з архітектурної моделі інформацію, необхідну для подальшого розрахунку на міцність. Для цього розроблені методи коригування архітектурної моделі та перетворення її у розрахункову схему, які полягають у перетворенні тривимірних елементів в двовимірні та одномірні, формуванні умов опирання, створенні скінченно-елементних сіток, визначенні навантажень і розподілу їх по різних завантаженнях. При виконанні триангуляції моделі, важливою задачею є забезпечення узгодженості скінченно-елементних сіток для подальшого коректного розрахунку на міцність. Запропоновано та реалізовано новий підхід до завдання послідовності зведення конструкцій, використовуючи поняття монтажної події. Монтажні події, що наступують одна за одною, утворюють стадію монтажу і включають монтаж або демонтаж несучих конструкцій, прикладання або зняття навантаження, а також і зміну конструктивного рішення.

Всі вищезазначені методи реалізовано у програмному комплексі автоматизованого проектування формоутворення та розрахунку САПФР.

При переході від реального об'єкта до його розрахункової схеми вводяться спрощення, які можуть істотно впливати на точність і достовірність отримуваних результатів. В процесі проведення низки чисельних експериментів були виявлені деякі особливості, що призводять до некоректної оцінки НДС, і надано рекомендації по їх усуненню. Наприклад, в результаті різної схеми роботи діафрагм і колон, в колонах в області середньої частини будівлі виникають великі моменти, що призводить до того, що колони верхніх поверхів можуть мати велику арматуру.

Плити перекриттів висотних будівель мають низку особливостей, до яких можна віднести: складну конфігурацію в плані, нерегулярно розташовані опори різного перерізу – діафрагма, пілони, хрестові, куткові, таврові перерізи колон, нерегулярно розташовані отвори, нерегулярні включення балкових ростверків, змінна товщина плити, пов'язана з необхідністю підсилення опорних зон. Важливим фактором є можливі нерівномірні осідання опор плити, особливо для верхніх поверхів, обумовлені нерівномірними деформаціями вертикальних елементів у загальній схемі будівлі. В цьому випадку напружено-деформований стан плит (особливо для верхніх поверхів) буде значно відрізнятися від розрахунку плит при умові, що вертикальні опори не мають зміщень. Протягом експлуатації ефект може посилитися за рахунок деформацій повзучості, які в найбільш навантажених елементах (колони і пілони) протікають більш інтенсивно. Насправді негативний вплив саме цих ефектів дещо зглажується, оскільки в процесі замонолічування перекриттів, нерівномірні осідання, що виникли на цей момент, усуваються. Методи

чисельного моделювання враховують ці особливості життєвого циклу конструкцій.

Важливою задачею при проектуванні є моделювання вузлів. Пропонується здійснювати моделювання вузлів шляхом введення додаткових абсолютно жорстких тіл (АЖТ) у вузли з'єднання конструктивних елементів з метою запобігання **пікових** стрибків зусиль в місцях перетинів конструктивних елементів. Введення АЖТ дозволяє у деякій мірі компенсувати похибки, що вносяться спрощуючими допущеннями, прийнятими при створенні розрахункових схем. Так, плиту або стіну прийнято замінити для розрахунку на двовимірну пластину, а колону або балку – на одновимірний стержень. В цьому випадку введення АЖТ у площині плити, яке відповідає перерізу колони, що примикає, дозволить зменшити переміщення, усунути концентрації напружень і таке інше, тобто робить модель наближеною до реального тривимірного прообразу.

Для повного та достовірного опису напружено-деформованого стану будь-якої будівлі та споруди, необхідно не тільки з високою точністю визначити зовнішні впливи, а й правильно провести перехід від реального об'єкта до його розрахункової схеми. Проведено класифікацію процесів, що впливають на формування (або зміну) НДС конструкцій будівель і споруд на протязі їх життєвого циклу, та вдосконалено методи теорії пружності, що дозволяють врахувати їх на основоположній стадії – стадії проектування (табл. 1).

В фізично нелінійних задачах відсутня лінійна залежність між напруженнями і деформаціями. Моделювання фізичної нелінійності матеріалів конструкцій проводиться за допомогою спеціальних скінченних елементів, що сприймають задану інформацію про залежності  $\sigma$ – $\varepsilon$ . Існує кілька методів для вирішення нелінійних задач різних типів: кроковий метод, метод січних, метод компенсуючих навантажень.

Розроблено новий метод урахування фізичної нелінійності – «метод диференціальних жорсткостей». Метод полягає в тому, що змінність жорсткості елемента відстежується, як по довжині елемента так і по його перерізу. Зміщення центрів тяжіння реалізується на принципі абсолютно жорсткого тіла та **кутів** чистого обертання. Розрахунок всієї системи виконується ітераційним методом січних, що означає ітераційний пошук такої лінійно-пружної системи (лінійний оператор  $A$  відповідає модулю  $E_m$ , який, природно перемінний по області  $\Omega$ ), яка під задане навантаження  $q$  має такі ж переміщення, як і система, що нелінійно деформується (нелінійний оператор  $A$ ). Початковий лінійний оператор  $A_0$  відповідає

$\frac{\sigma_{i,0}}{\varepsilon_{i,0}} = \left. \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i} \right|_{\varepsilon_i=0}$ . Рівняння методу скінченних елементів на  $m+1$  ітерації буде мати

вигляд:  $K^{(m)} q_{m+1} = P$ ;

$$\sum_{r \in l_1} K_{l_1, r}^{(m)} q_{1, m+1} + \dots + \sum_{r \in l_s} K_{l_s, r}^{(m)} q_{s, m+1} + \dots + \sum_{r \in l_n} K_{l_n, r}^{(m)} q_{n, m+1} = P_l, \quad (1)$$

де  $K_{ls,r}^{(m)}$  – елемент матриці жорсткості  $r$ -го елемента;

$q_{s,m+1}$  –  $s$ -та ступінь свободи (переміщення) на  $m+1$  ітерації;

$P_l$  – вузлова зовнішня сила по напрямку  $l$  ступеня свободи.

Таблиця 1

## Класифікація процесів життєвого циклу, що впливають на НДС конструкцій

Процеси життєвого циклу	Опис	Тип нелінійності
Процес навантаження	Відстеження початкових стадій навантаження, коли робота конструкції близька до лінійно-пружної, стадій послідовного розвитку тріщин у бетоні; стадій послідовного розвитку пластичних деформацій у бетоні та арматурі; стадій, які безпосередньо передують руйнуванню	Фізична, геометрична, конструктивна
Процес зведення	НДС визначається для всіх конструктивних схем, що послідовно змінюються, відповідних етапам зведення і модель зведеної конструкції «зберігає пам'ять» про історію зведення	Генетична, фізична, конструктивна
Процес експлуатаційної стадії	Моделювання реологічних процесів зміни НДС конструкції при тривалому навантаженні, пов'язаних з повзучістю і зміною властивостей у часі	Фізична, геометрична
Процеси запроектних впливів	Моделювання процесів «приспосовуваності» конструкції при аварійних ситуаціях, коли при раптовому виході з ладу одного або декількох елементів конструкція пристосовується до нової ситуації, змінивши (іноді за рахунок втрати експлуатаційних якостей) свою первісну конструктивну схему, не допустивши обвалення всієї споруди	Фізична, геометрична
Процеси динамічних впливів	Моделювання в часі динамічного впливу (на основі методу прямого інтегрування) дає можливість простежити включення і виключення односторонніх в'язей, відкриття і закриття тріщин, і багато інших ефектів	Нелінійна динаміка

Матриця жорсткості  $[K_r]^{(m)}$  будується як для лінійно-пружного тіла з перемінним по області скінченного елемента модулем  $E_m = \frac{\sigma_{i,m}}{\varepsilon_{i,m}}$ . Значення елементів загальної матриці  $[K(q)]$  на кожному етапі вирішення системи лінійних

рівнянь виду (1) визначається через значення вектора  $\{q\}$ , отриманого на попередньому етапі

$$[K(q^{(m-1)})]\{q^{(m)}\} = \{P\}, \quad (2)$$

де  $m$  – номер ітерації. На першій ітерації ( $m=1$ ) значення невідомих  $q_i (i=1, 2 \dots n)$ , від яких залежать елементи матриці  $[K]$  можна прийняти рівними нулю. В цьому випадку нелінійні складові обертаються в нуль. В результаті отримуємо матрицю  $[K(q)] = [K]_{\Delta}$  лінійної задачі.

Процес послідовних рішень рівняння (2) з процедурою уточнення елементів матриці  $[K]$  на кожній ітерації продовжується до тих пір, поки різниця між результатами рішення, отриманими на даній і попередній ітерації, виявиться менше заданої точності.

Застосування описаного вище методу дозволяє шляхом деформаційного розрахунку вийти на граничний стан конструкції по несучій здатності.

Принципи, закладені в метод диференційних жорсткостей наступні. Спочатку задаються вихідні дані як для звичайного розрахунку. Потім задається навантаження, яке, на думку проектувальника, в основному визначить напружено-деформовані стани елементів конструкції - розвиток тріщин, пластичні деформації бетону і арматури. На призначене завантаження виконується розрахунок в нелінійній постановці з підбором на кожній ітерації арматури залізобетонних елементів. Розрахунок виконується, застосовуючи ітераційний метод січних. В результаті розрахунку визначаються жорсткісні характеристики елементів, відповідні січним модулям деформації на останній ітерації нелінійного розрахунку. Жорсткісні характеристики стержневих елементів визначаються як для стержнів змінної жорсткості. При визначенні матриці жорсткості стержня із змінними жорсткостними характеристиками по довжині елемента, враховується зміщення центру тяжіння перерізу (принцип абсолютно жорсткого тіла) та кути чистого обертання. Матриця жорсткості будується на основі суперелементної процедури. Для пластинчастих елементів жорсткості визначаються як для ортотропних пластин. Визначення січних характеристик жорсткості перерізу стержня ( $El_x$ ,  $El_y$ ,  $GIp$ ,  $EF$ ) відповідно до зусиль  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $N$  виконується чисельними методами на основі рішення трьох рівнянь рівноваги:

$$\sum M_x = \sum_{j=1}^n f_{j\sigma} \sigma_{j\sigma} y_j + \sum_{i=1}^m f_{ia} \sigma_{ia} y_{ia} + M_x + Ne_x = 0; \quad (3)$$

$$\sum M_y = \sum_{j=1}^n f_{j\sigma} \sigma_{j\sigma} x_j + \sum_{i=1}^m f_{ia} \sigma_{ia} x_{ia} + M_y + Ne_y = 0; \quad (4)$$

$$\sum z = \sum_{j=1}^n f_{j\sigma} \sigma_{j\sigma} + \sum_{i=1}^m f_{ia} \sigma_{ia} + N = 0; \quad (5)$$

$$\text{де } f_{i\sigma} = \psi_1(y_c, \alpha, \beta); f_{i\sigma} = \psi_2(y_c, \alpha, \beta); y_j = \psi_3(y_c, \alpha, \beta);$$

$$x_j = \psi_4(y_c, \alpha, \beta); y_{ia} = \psi_5(y_c, \alpha, \beta); x_{ia} = \psi_6(y_c, \alpha, \beta);$$

Рівняння складаються чисельно відносно трьох невідомих:  $y_c$  – зміщення нейтральної осі;  $\alpha$  – кут повороту нейтральної осі;  $\beta$  – кут повороту перерізу

(застосовується закон плоских перерізів). Частина перерізу, що залишилася (стиснутий бетон) розчленовується на смуги, паралельні нейтральній вісі. Для кожної смуги визначається  $\varepsilon_j$ , і січний модуль пружності  $E_j$  (рис.2). Після знаходження  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $y_c$  визначаються січні жорсткісні характеристики  $EI_x$ ,  $EI_y$ ,  $GI_{kp}$ ,  $EF$ . Система, що лінійно-деформується, яка має жорсткісні характеристики, отримані на останній ітерації методу січних  $K^{(m)}$ , в подальшому використовується для наступного розрахунку на всі задані навантаження (в тому числі і динамічні). В системі визначаються розрахункові сполучення зусиль, розрахункові сполучення навантажень (РСН), підбирається проектна арматура і виконується конструювання.

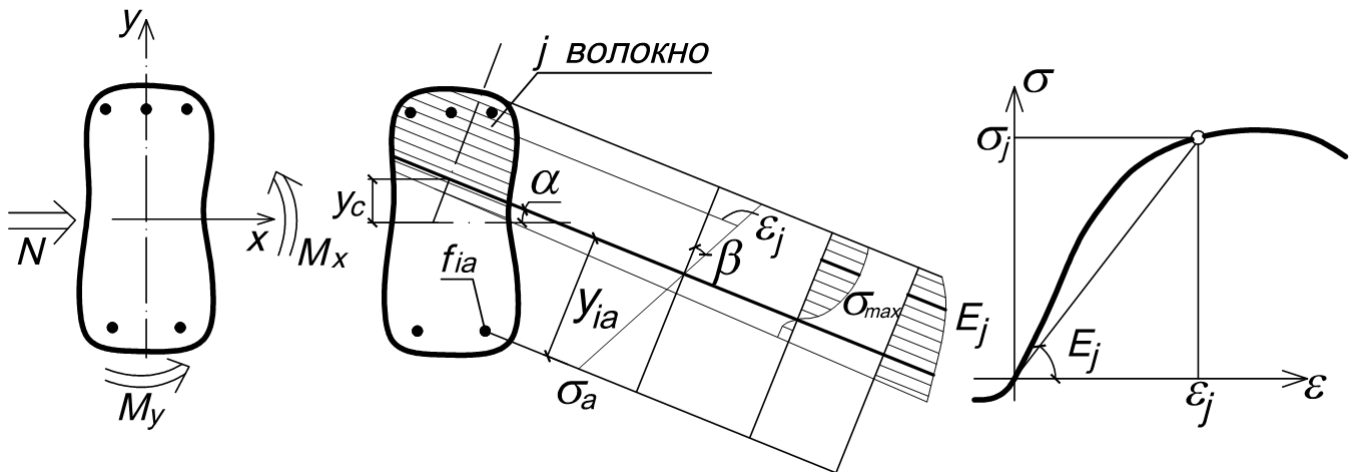


Рис. 2. Визначення характеристик жорсткості перерізу стержня на  $m$ -ітерації

Така організація нелінійного розрахунку не вимагає трудомісткого етапу задання арматури, так як арматура підбирається автоматично під час розрахунку, і дає досить адекватні результати. Так, чисельні дослідження, проведені на стадії тестової експлуатації, показують, що переміщення від експлуатаційних навантажень в 2,5...3,5 рази перевищують переміщення, отримані на основі лінійно-пружного розрахунку, і в ряді випадків спостерігається певний перерозподіл зусиль. Метод диференціальних жорсткостей дозволяє інтегрально оцінити вплив зміни жорсткостей на перерозподіл зусиль і збільшення переміщень для експлуатаційних навантажень в поточних практичних розрахунках.

Розроблено структурна методологічна схема моделювання будівельного об'єкту з урахуванням усіх процесів зміни напружено-деформованого стану конструкцій на кожній стадії. Стадії зведення відповідають послідовності зведення конструкції, кожна з яких «зберігає» історію навантаження. Стадії послідовно змінюють одна одну, відповідно зведення конструкція на кожній стадії має змінений НДС. Остання  $MC_k$  стадія відповідає зведеній конструкції, і її НДС «зберігає» всю інформацію послідовності зведення, пов'язану із змінами конструктивної схеми, додаванням і зняттям монтажних навантажень і т.п. (рис. 3)

Вихідні дані для останнього етапу зведення (стадія  $MC_k$ ) відповідають експлуатаційній стадії об'єкта, тобто тій стадії, коли об'єкт повністю зведений: прибрані тимчасові опори (стійки підмостків), набрана експлуатаційна міцність бетону і т.і. Ця стадія є стартовою для розрахунку на експлуатаційні навантаження (власна вага, вітер, сніг, корисні навантаження). НДС на експлуатаційних стадіях

визначається розрахунком на різні сполучення навантажень ( $RCH_1$  – експлуатаційні статичні навантаження;  $RCH_2$  – корисні навантаження з урахуванням пульсаційної вітрової складової,  $RCH_3$  – корисні навантаження з урахуванням сейсмічного впливу і т.д.). Деякі експлуатаційні стадії в свою чергу є стартовими для моделювання аварійних ситуацій, які можуть виникнути з ймовірністю  $P_j$ .

У **третьому розділі** розглядається стадія врахування процесу зведення для будівельних об'єктів різного призначення. Пропонуються рішення, що дозволяють спростити врахування стадійності зведення будівлі при створенні розрахункових моделей. Стадія зведення формує НДС конструкції. В процесі зведення конструктивна схема будівельного об'єкта може змінюватися багаторазово в залежності від послідовності зведення, що обумовлює зміну конструктивної та розрахункової схеми будівлі, та її НДС в часі. Зусилля і переміщення на кожній стадії зберігаються, визначаючи перерізи елементів і конструкції вузлів саме на цій стадії.

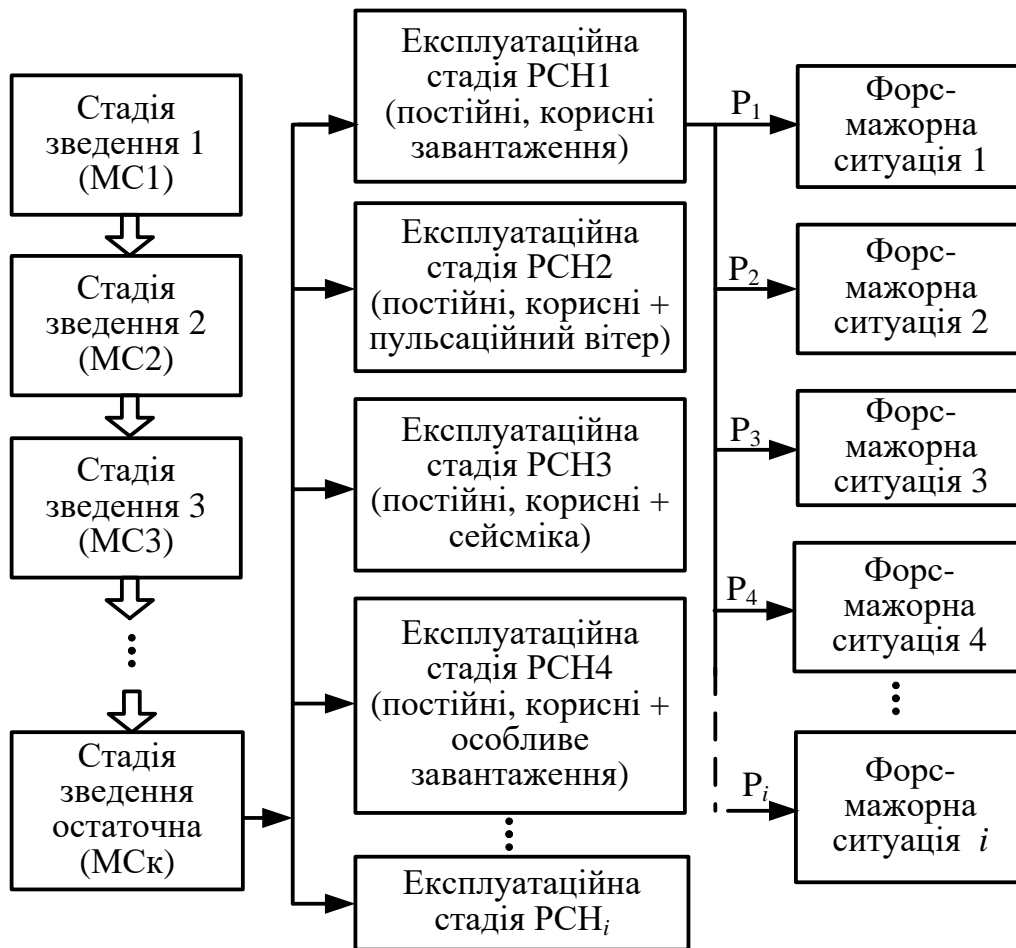


Рис. 3. Структурна схема моделювання будівельного об'єкта

При зведенні монолітних залізобетонних конструкцій важливим фактором, який необхідно враховувати при чисельному моделюванні, є нелінійні властивості бетону, тобто зміна характеристик жорсткості в процесі навантаження (повзучість, тріщини). В процесі монтажу при будівництві перехід до нової монтажної стадії часто здійснюється, коли зведена на попередніх стадіях конструкція ще не набрала проектної 28-добової міцності. Це також зумовлює необхідність врахування



нелінійних ефектів, так як від стадії до стадії змінюється жорсткість зведених елементів, відповідно до часу їх зведення.

Чисельне моделювання процесу зведення представляється нелінійною задачею, навіть якщо не враховувати особливості, пов'язані з нелінійними властивостями бетону. В процесі зведення проявляється генетична нелінійність, обумовлена зміною конструктивної схеми. Така нелінійність викликана тим, що НДС миттєво зведеної конструкції не еквівалентний НДС конструкції, отриманої при врахуванні всієї історії зведення (зміна розрахункової схеми, виникнення і зняття монтажних опор, навантажень і т.д.)

Пропонується методика, що дозволяє проводити розрахунки з урахуванням послідовності зведення, при цьому мати можливість варіантного проектування. Методика ґрунтується на модифікації та вдосконаленні методу послідовних навантажень, який є одним з різновидів крокового методу.

Система нелінійних рівнянь, які описують нелінійну задачу, виглядає наступним чином:

$$Au = f, \quad (6)$$

де  $A$  – нелінійний оператор задачі;  
 $u$  – вектор шуканих переміщень;  
 $f$  – вектор зовнішніх навантажень.

Ідея крокового методу полягає в заміні нелінійних рівнянь (6) рекурентною послідовністю лінійних, які на  $m$  кроці мають вигляд:

$$A_m \Delta u_{m+1} = \Delta \beta_{m+1} f; \quad u_{m+1} = u_m + \Delta u_{m+1}; \quad (7)$$

де  $A_m$  – лінійний оператор, який в розгорнутому вигляді має вигляд:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \psi_1}{\partial u_1} |_{u_m} & \frac{\partial \psi_1}{\partial u_j} |_{u_m} & \frac{\partial \psi_1}{\partial u_n} |_{u_m} \\ \frac{\partial \psi_l}{\partial u_1} |_{u_m} & \frac{\partial \psi_l}{\partial u_j} |_{u_m} & \frac{\partial \psi_l}{\partial u_n} |_{u_m} \\ \frac{\partial \psi_n}{\partial u_1} |_{u_m} & \frac{\partial \psi_n}{\partial u_j} |_{u_m} & \frac{\partial \psi_n}{\partial u_n} |_{u_m} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Тут  $\psi_i (i=1, 2, \dots, n)$  – нелінійні оператори, тобто  $l$  рівняння системи (6) виглядає як  $\psi_j(u_1, u_2, \dots, u_n) = P_j; \beta$ ;  $\beta$  – параметр навантаження.

Суть модифікації методу полягає в тому, що параметр  $\beta$  вводиться до навантаження  $f$ , тобто  $Au = \beta f$ .

При  $\beta = 0$  легко визначається початкове рішення  $u_0$  (при  $f = 0, u = 0$ ), при  $\beta = 1$  система перетворюється на шукану. Послідовно змінюючи  $\beta$  від 0 до 1, знаходиться наближене рішення. Обчислювальна схема на кожному кроці виходить з таких міркувань: введемо гіпотезу, що на  $m$ -етапі  $\beta = \beta_m$  відомо рішення, тобто:

$$Au_m = \beta_m f. \quad (9)$$

Змінімо  $\beta_m$  на величину  $\Delta\beta_{m+1}$  так, щоб  $\beta_{m+1} = \beta_m + \Delta\beta_{m+1}$  була ближче до одиниці, ніж  $\beta_m$ . Тоді:

$$A(u_m + \Delta u_{m+1}) = (\beta_m + \Delta\beta_{m+1})f. \quad (10)$$

Розкладемо ліву частину (10) в ряд Тейлора, тоді:

$$Au_m + \sum_{i=1}^k \frac{1}{i!} \left( \frac{\partial^i}{\partial u^i} A \Big|_{u_m} \Delta u_{m+1}^i \right) + R_k = \beta_m f + \Delta\beta_{m+1} f. \quad (11)$$

Нехтуючи квадратами і вищими ступенями  $\Delta u_{m+1}$  (величина  $\Delta\beta$  повинна допускати цю процедуру) і з урахуванням (10) одержимо лінеаризовану систему для знаходження  $\Delta u_{m+1}$ , тобто:

$$A_m \Delta u_{m+1} = \Delta\beta_{m+1} f, \quad u_{m+1} = u_m + \Delta u_{m+1}, \quad (12)$$

де  $A_m$  – лінійний оператор  $\left( A_m = \frac{d}{du} A \Big|_{u_m} \right)$ .

Напруження визначаються за формулою, аналогічною (12):

$$\{\sigma\}^{m+1} = \{\sigma\}^m + \{\Delta\sigma\}^m. \quad (13)$$

Замість січного модуля пружності тут застосовується дотичний модуль деформації. Значення дотичного модуля обчислюється по напружено-деформованому стану конструкції попередньої ступені завантаження. Для ізотропних матеріалів для визначення дотичного модуля деформацій використовується наступний підхід. При коефіцієнті Пуасона, відмінному від 0.5, псевдопружні параметри обчислюються за формулами:

$$E_{k(m)}^* = E_k^{m-1} / \Omega_k; \quad (14)$$

$$\nu_{k(m)}^* = \left[ \frac{1+\nu}{3} - \frac{(1-2\nu)E_k^{m-1}}{3E_0} \right] / \Omega_k, \quad (15)$$

де  $E_0$ , – початковий модуль пружності,  $\nu$  – коефіцієнт Пуасона;  $E_k$  – дотичний модуль узагальненої кривої деформування;

$$\Omega_k = \left[ \frac{2(1+\nu)}{3} + \frac{1-2\nu}{3E_0} E_k^{m-1} \right]. \quad (16)$$

Якщо на  $m$ -му етапі відбувається розвантаження, то для розрахунку приймається початковий модуль пружності  $E_0$ .

У роботі використовується більш загальний підхід, заснований на залежності  $\sigma_i = \sigma(\varepsilon_i)$ , де  $\sigma_i$  – еквівалентні напруження,  $\varepsilon_i$  – еквівалентні деформації. В цьому випадку дотичний модуль деформації визначається, як  $\frac{\partial \sigma_i}{\partial \varepsilon_i}$ .

У фізичному сенсі цей процес можна трактувати як поступове збільшення навантаження, що починається від 0 і який закінчується заданим  $f$ .

На  $m+1$  ітерації рівняння методу скінченних елементів має вигляд:

$$K_m \Delta u_{m+1} = \beta_{m+1} f, \quad (17)$$

де  $K_m$  – матриця канонічних рівнянь на  $m$ -му етапі розрахунку.

Розгорнуте  $l$  рівняння має вигляд:

$$\sum_{z \in l_l} K_{l,r}^{(m)} \Delta u_{l,m+1} + \dots + \sum_{z \in l_j} K_{l,j}^{(m)} \Delta u_{j,m+1} + \dots + \sum_{z \in l_n} K_{l,n,r}^{(m)} \Delta u_{n,m+1} = \Delta \beta_{m+1} P l \quad (18)$$

Переміщення ( $u_m$ ) і зусилля ( $s_m$ ) для конструкції зведеної раніше (для етапів 1, 2, ...  $m-1$ ) визначаються за формулами:

$$u_m = u_{m-1} + \Delta u_m, S_m = S_{m-1} + \Delta S_m \quad (19)$$

Лінеаризований оператор  $A_m$  відповідає дотичним характеристикам жорсткості, тобто  $A_m = \frac{d}{du} A \Big|_{u_m}$ . Визначення дотичних характеристик жорсткості

аналогічно визначенню січних характеристик жорсткості з тією лише різницею, що для  $j$ -го шару визначається не січний, а дотичний модуль (див. рис. 2).

Модифікація крокового методу, що запропонована в дисертації, полягає в наступному. На відміну від (17) і (18)  $K_m$  не тільки складаються з урахуванням фізично нелінійних властивостей матеріалу, але і з урахуванням зміни топології конструкції, так як на  $m$  етапі розрахунку ( $m$  стадії зведення) враховується поява нових елементів. При врахуванні фізичної та геометричної нелінійності рішення системи (18) вимагає додаткових кроків типу (17).

Таким чином, метод послідовних навантажень застосовується для моделювання процесу навантаження. На його основі розроблено методику розрахунку конструкцій з урахуванням процесу зведення. Алгоритм чисельного моделювання процесу зведення, що дозволяє врахувати історію створення конструкції і включає відстежування різних подій: видалення і включення тимчасових опор, включення і виключення внутрішніх в'язей, зміна жорсткості і міцності залізобетонних конструкцій у зв'язку з поступовим набором 28-добової міцності, ефекти добетонування зазорів у вертикальних елементах і багато іншого наведено на рис. 4.

На кожному етапі зведення об'єкта відбувається розрахунок відповідної конструктивної схеми на власну вагу і монтажні навантаження з урахуванням наявних, знятих або доданих тимчасових опор.

В результаті проведених численних експериментів по розрахунку багатопверхових будівель було встановлено:

- монтаж елементів несучої системи призводить до зміни розрахункової схеми будівлі, прикладання дедалі більшого вертикального навантаження до зміненої розрахункової схеми будівлі впливає на НДС остаточної конструктивної схеми;

- формування напружено-деформованого стану несучої системи значною мірою залежить від способу монтажу;

- розрахунок перекриттів в загальній системі будівлі значно відрізняється від розрахунку окремо взятого ригеля (перекриття) на незміщуваних вертикальних опорах;

– розрахунок з урахуванням зведення дає для вертикальних елементів (колони, діафрагми) результати, що значно відрізняються від традиційного розрахунку (остаточна схема розраховується як одномоментно створена).



Рис. 4. Алгоритм розрахунку конструкцій будівель і споруд з урахуванням процесу зведення

Це пояснюється моделюванням замонолічування зазорів, які обумовлені деформаціями вертикальних елементів від власної ваги зведеної конструкції, при бетонуванні перекриттів.

В роботі наведено ряд прикладів чисельного моделювання процесу зведення великопрольотних покриттів: сферична оболонка на плоскому плані, де зведення моделюється навішуванням збірних залізобетонних плит; великопрольотна сталева мембрана товщиною 6 мм, прольотом 210 x 160 м та ін.

У **четвертому розділі** виконаний аналіз процесу формування НДС конструкцій будівель і споруд на стадії їх експлуатації при дії різних навантажень і впливів виявив, що прийняті нормативні документи і методи розрахунку не передбачають розрахунок конструкцій з тріщинами і ушкодженнями, що розвиваються, і не дозволяють прогнозувати поведінку об'єкта в аварійних ситуаціях. Для визначення резервів несучої здатності при наявності дефектів, або для виявлення ділянок конструкції, в яких можлива поява і розвиток тріщин, запропоновані методики, що дозволяють моделювати ті чи інші ситуації і процеси, в ході яких виконувати складні нелінійні розрахунки, враховувати всі особливості будівельних конструкцій, в тому числі, наявність та розвиток системи тріщин або погіршення властивостей матеріалів, взаємодію будівлі з ґрунтовим масивом, вплив часу і поетапну зміну зовнішніх навантажень.

Реологічні властивості бетону, обумовлені, в основному, його повзучістю, а також наростання переміщень в часі дуже впливають на НДС конструкції, навіть якщо зовнішнє навантаження не зазнає особливих змін. Так, з плином часу відбувається перерозподіл зусиль між сильно і слабо навантаженими елементами, між арматурою і бетоном в перерізах елементів.

Несуча здатність конструкції, що експлуатується, може бути точно встановлена лише при її руйнуванні, що неприйнятно з практичної точки зору, а неруйнівні методи контролю дають лише непрямую інформацію про стан об'єкту. Тому важливим моментом стає проведення чисельного експерименту з визначення резервів несучої здатності конструкції.

Автором запропонований алгоритм і методика розрахунку конструкцій з урахуванням повзучості бетону, який полягає в наступному:

- виконується розрахунок в лінійній постановці на всі види навантажень (статичні, силові, статичні деформаційні, динамічні);

- визначаються розрахункові сполучення зусиль або розрахункові сполучення навантажень;

- виконується підбір арматури в перерізах стержневих або пластинчастих елементів;

- виконується уніфікація армування елементів;

- по результатам армування формуються нові жорсткісні характеристики конструктивних елементів для подальшого нелінійного розрахунку;

- задаються параметри повзучості бетону, що враховують вологість і усадку бетону;

- призначається навантаження, на яке буде проводитися розрахунок з урахуванням повзучості бетону;

- виконується розрахунок для заданих проміжків часу. На кожному етапі розрахунку для кожного елемента визначається нова жорсткість, яка залежить від напруження бетону в цьому елементі та заданих параметрів повзучості.

Нові змінні жорсткості отримуються в точках інтегрування як по перерізу, так і по області скінченного елемента, відповідно до заданої діаграми деформування. На кожному етапі визначаються зусилля, переміщення і нові жорсткості по дотичному модулю деформації для заданого проміжку часу. Алгоритм дозволяє обчислити за розрахунковий крок часу  $\Delta t$  прирощення деформації  $\Delta \varepsilon$  і додаткових параметрів, що характеризують відношення прирощення деформації повзучості до поточного напруження  $\frac{d\Delta \varepsilon}{d\sigma}$  та прирощення деформації повзучості до поточної деформації  $\frac{d\Delta \varepsilon}{d\varepsilon}$ .

Описана методика реалізована в програмному комплексі ЛІРА-САПР.

Для моделювання зміни НДС конструкцій в часі розроблено метод послідовних жорсткостей. Цей метод є різновидом крокових методів, які в свою чергу єдинообразно укладаються в схему відомого в прикладній математиці методу диференціювання по параметру (метода продовження).

Суть пропонованої модифікації полягає в тому, що на основі нелінійного оператора  $A$  утворюється нелінійний оператор  $\alpha_a$ , таким чином, щоб при  $\alpha = 1$ ,  $\alpha = A$ . Процес починається з того, що знаходиться таке значення, для якого можна вирішити систему  $\alpha_a A u^{(0)} = f$ . Подальший розрахунок проводиться поетапною

змінною  $\alpha$  від  $\alpha_0$  до 1. Обчислювальна схема на кожному кроці виходить з таких міркувань: хай на  $m$  етапі при  $\alpha = \alpha_m$  відомо рішення  $u_m$ , тобто  $\alpha_m A u_m = f$ . Змінимо  $\alpha_m$  на величину  $\Delta\alpha_{m+1}$  так, щоб  $\alpha_{m+1} = \alpha_m + \Delta\alpha_{m+1}$  було ближче до одиниці, ніж  $\alpha_m$ . Тоді:

$$\alpha_{m+1} A(u_m + \Delta u_{m+1}) = f \quad (20)$$

Розкладемо (20) в ряд Тейлора. Тоді:

$$\alpha_{m+1} \Delta u_m + \sum_{i=1}^k \frac{1}{i!} \frac{\partial'}{\partial u'} \alpha_{m+1} A \Delta u'_{m+1} + R_k = f.$$

Нехтуючи квадратами і вищими ступенями  $\Delta u_{m+1}$ , отримаємо лінеаризовану систему для знаходження  $\Delta u_{m+1}$ , тобто

$$\alpha_{m+1} A_m \Delta u_{m+1} = f - \alpha_{m+1} A u_m, \quad (21)$$

де  $A_m$  – лінійний оператор.

Процес продовжується до тих пір, поки  $\alpha$  не стане дорівнювати 1, величини  $\Delta\alpha$  необхідно приймати такими, щоб нехтування вищими ступенями  $\Delta u'_{m+1}$  ( $i > 1$ ) не перевищувало задану точність рішення задачі. У фізичному сенсі цей процес можна трактувати як поступову зміну жорсткості системи. Спочатку жорсткість системи призначається настільки великою ( $\alpha_0 \gg 1$ ), щоб під задане навантаження  $f$  робота системи була близька до лінійної, тоді  $u_0$  знайдеться з рівнянь  $\alpha_0 A_0 u_0 = f$ .

Для одновимірного випадку ітераційний процес (20) допускає графічну інтерпретацію (рис. 5).

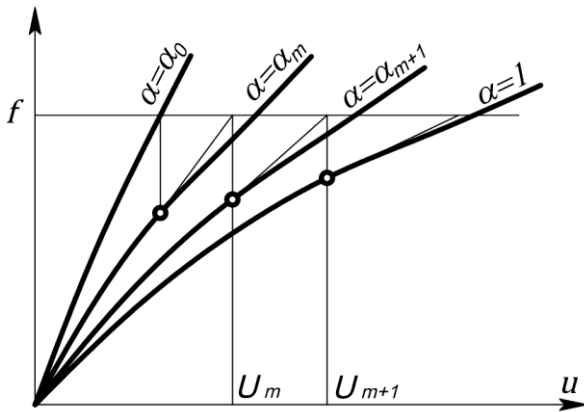


Рис. 5. Графічна інтерпретація методу послідовних жорсткостей

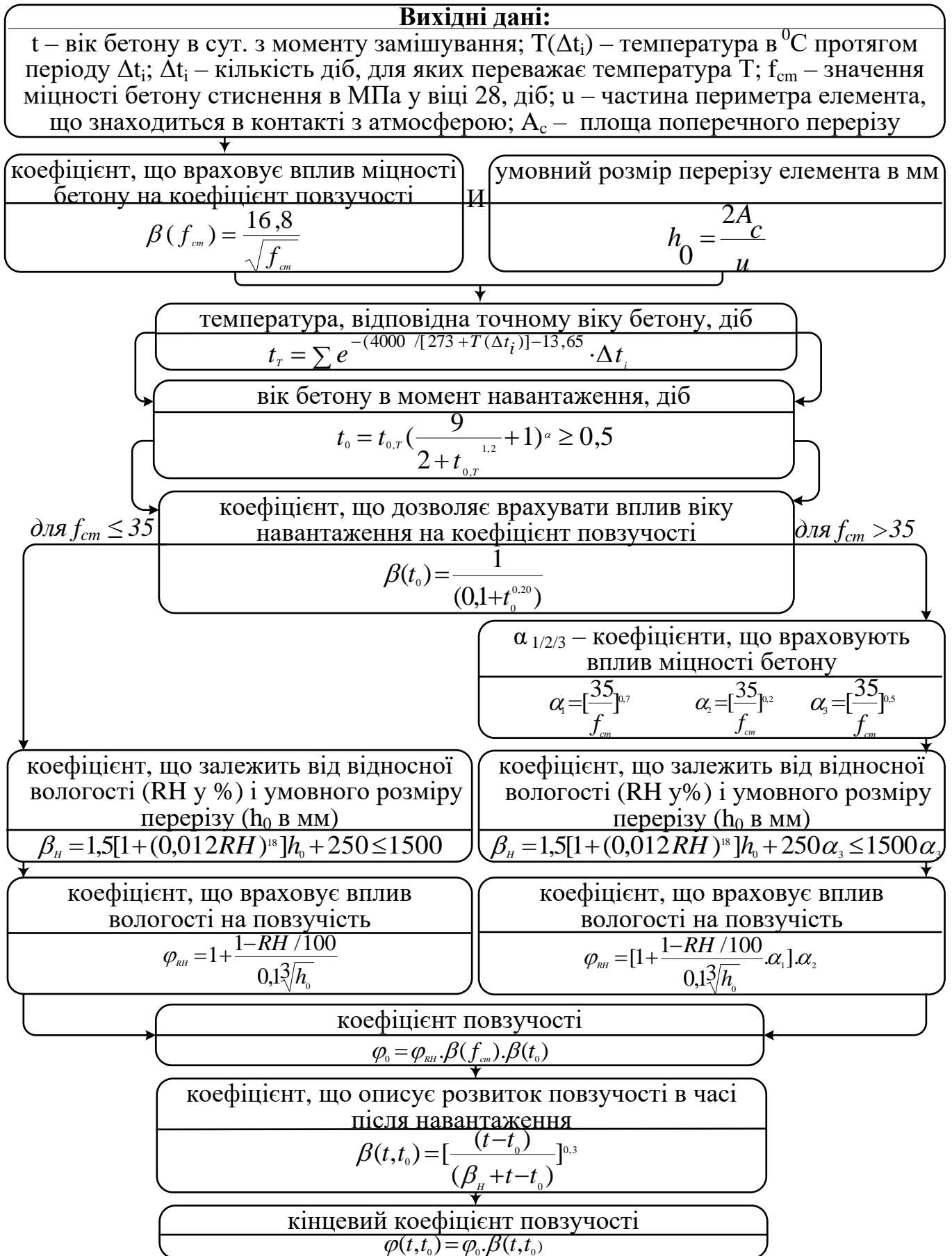
На  $m+1$  ітерації  $l$  ( $l=1,2,\dots,n$ ) рівняння методу скінченних елементів матиме вигляд:

$$\begin{aligned} & \alpha_{m+1} \sum_{r \in l_1} K_{l_1,r}^{(m)} \Delta q_{l_1,m+1} + \dots + \alpha_{m+1} \sum_{r \in l_s} K_{l_s,r}^{(m)} \Delta q_{l_s,m+1} + \dots + \\ & + \alpha_{m+1} \sum_{r \in l_n} K_{l_n,r}^{(m)} \Delta q_{l_n,m+1} = P_l - \alpha_{m+1} \sum_{s \in l} \sum_{r \in l_s} K_{l_s,r} q_{s,m} \end{aligned} \quad (22)$$

В розроблених автором алгоритмах врахування повзучості реалізовано на основі модифікованої теорії старіння, згідно з якою дотичний (тангенціальний) модуль пружності залежить від початкового модуля пружності  $E_{cm}$ , відносної вологості середовища RH, часу експлуатації  $t$  і напруження в бетоні  $\sigma$ . Також цю залежність можна виразити за допомогою коефіцієнта повзучості  $\varphi(t, t_0)$ .

$$E_c = f(E_{cm}, RH, t, \sigma); \quad E_c = \frac{E_{cm}}{\varphi(t, t_0)}. \quad (23)$$

На рис. 6 представлений алгоритм обчислення умовного коефіцієнта повзучості для бетону  $\varphi_0$  і коефіцієнта  $\beta_{RH}$ , що враховує відносну вологість воздуха (RH, %) та умовний розмір елемента ( $h_0$ , мм).

Рис. 6. Алгоритм обчислення coefficienta повзучості для бетону  $\varphi_0$  і coefficienta  $\beta_H$

Повзучість і усадка бетону залежать, в основному, від відносної вологості навколишнього середовища. На повзучість і усадку бетону також впливають геометричні розміри конструктивного елемента і склад бетону, ступінь зрілості бетону (початкова міцність) при первісному прикладенні навантаження, а також тривалість навантажування і величина навантаження. Задача теорії повзучості стосовно до визначення напруженого стану полягає в встановленні зв'язку між напруженням, деформаціями, температурою, часом і цілим рядом структурних параметрів, що характеризують стан матеріалу в будь який поточний момент часу аж до руйнування. Коефіцієнт повзучості  $\varphi(t, t_0)$  пов'язаний з дотичним (тангенціальним) модулем пружності  $E_c$ , який може бути прийнятий рівним  $1,05E_{cm}$ . ( $E_c = 1.05 E_{cm}$ ), де  $E_{cm}$  – модуль деформації.

Верифікацію запропонованих методик проведено на ряді конструкцій. Результати чисельного експерименту за наведеною методикою демонструють деякий перерозподіл зусиль і значне збільшення деформацій в порівнянні з пружним розрахунком (рис. 7). Так, в конструкціях пологих оболонок або арок, внаслідок повзучості з часом значно збільшуються прогини. Оболонка (арка) стає більш пологою, що в свою чергу може призвести до критичного збільшення зусиль та в ряді випадків до аварій (рис. 8).

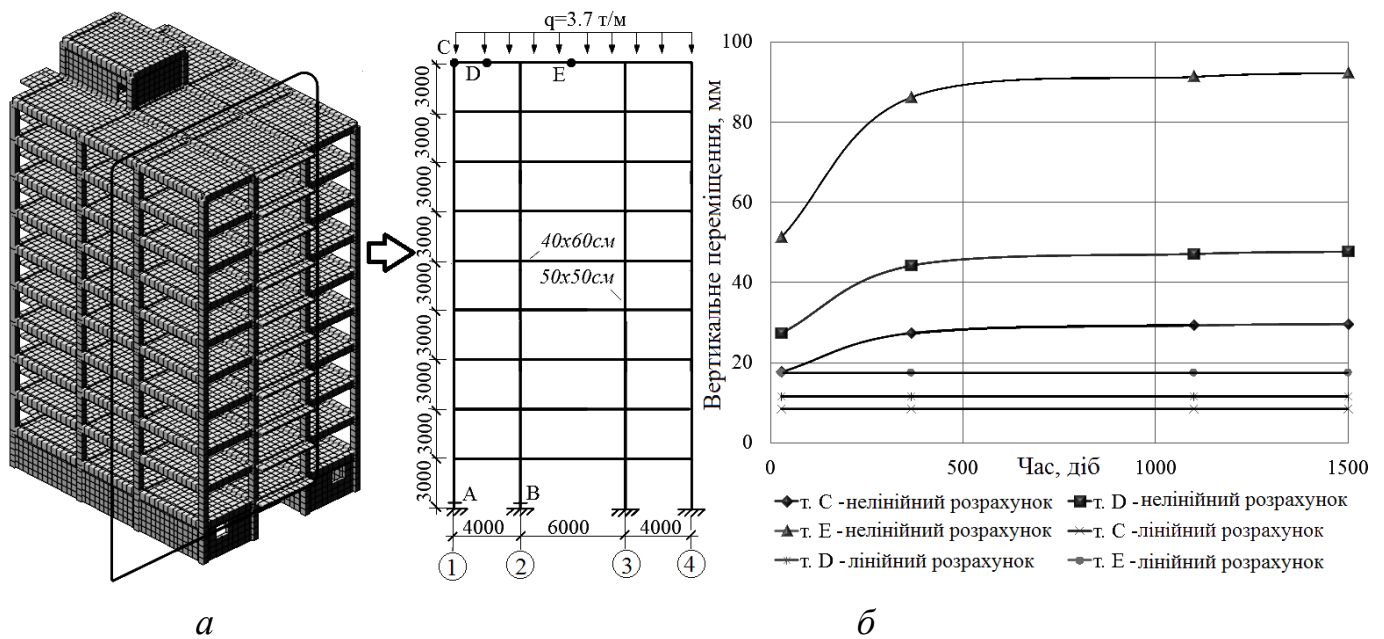


Рис. 7. Розрахункова схема типового багатоповерхового будинку (а) та графіки розвитку в часі величин вертикальних переміщень в контрольних точках (б)

В результаті проведених чисельних експериментів встановлено, що моделювання урахування реологічних властивостей залізобетону дозволяє виявити значне зростання переміщень і зусиль, що говорить про доцільність на етапі проектування моделювати роботу конструкцій в експлуатаційний період з урахуванням повзучості (реологічних властивостей матеріалу). В ході вирішення ряду тестових задач встановлено такі факти:



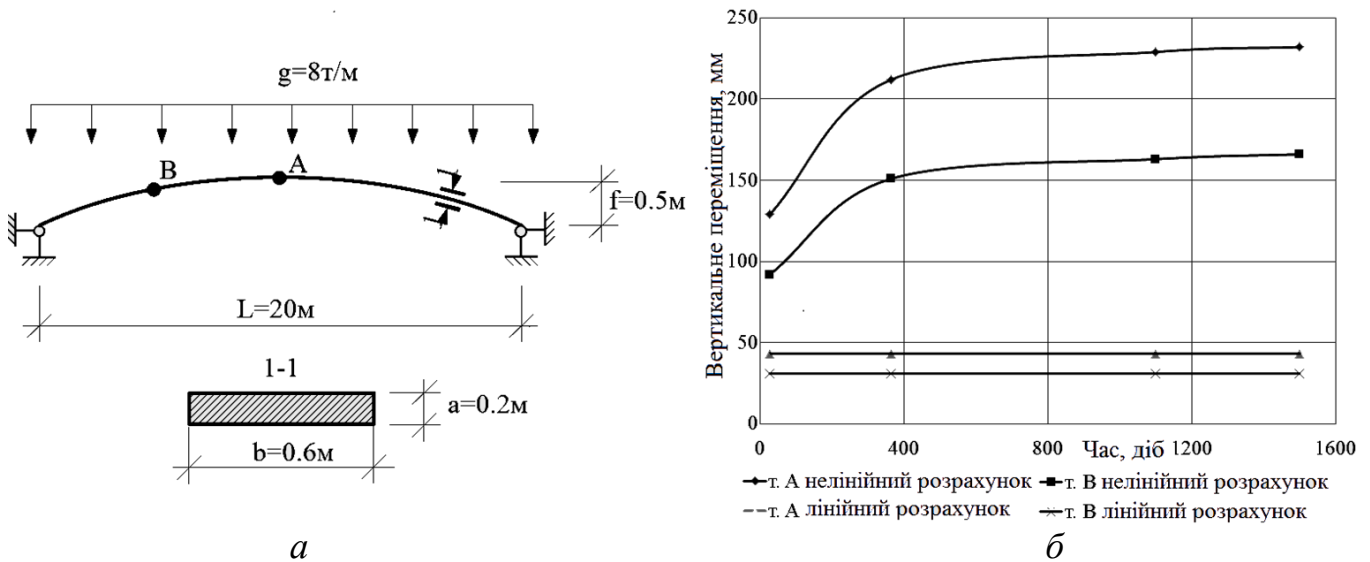


Рис. 8. Розрахункова схема пологої оболонки (а) та графіки розвитку в часі величин вертикальних переміщень в контрольних точках (б)

– при тривалій дії навантаження відбувається перерозподіл зусиль між сильно навантаженими елементами (зусилля в них зменшуються) і менш навантаженими (зусилля в них збільшуються);

– повзучість бетону зумовлює зростання переміщень, що, крім збільшення деформативності, може викликати збільшення зусиль (показовий випадок пологої оболонки);

– в залізобетонному елементі при тривалій дії навантаження в результаті повзучості бетону відбувається перерозподіл зусиль між бетоном і арматурою;

– в центрально-стиснутих залізобетонних колонах усадка і повзучість діють в одному напрямку, зменшуючи напруження в бетоні і збільшуючи їх в поздовжній арматурі, так як бетон, деформуючись, розвантажується;

– нерівномірне осідання вертикальних елементів (колони і пілони мають більші деформації, ніж стіни і діафрагми);

– конструкції, як правило, включаються в роботу до набору бетоном розрахункової міцності (як правило, розпалубка здійснюється значно раніше, ніж бетон набере розрахункову 28-добову міцність), що призводить до збільшення деформації повзучості бетону.

У п'ятому розділі виконана класифікація всіх факторів, що призводять до відмов конструктивних елементів і конструктивних систем, надано стадії розвитку аварії. На основі аналізу всіх факторів, що призводять до відмов конструктивних елементів і конструктивних систем, і в ході проведення причинно-наслідкового аналізу виникнення аварійної ситуації встановлено наступне. Якщо не брати до уваги і виключити конструктивні дефекти, відмови конструктивних елементів і конструктивних систем можна розділити на дві категорії: відмови, що виникають в нормальних умовах експлуатації в результаті природних процесів старіння, зносу, корозування і т.д.; раптові катастрофічні відмови, що виникають в результаті зовнішніх впливів, що перевищують проектні навантаження будівельних об'єктів, наприклад, сейсмічний вплив, вибух, удар та інші форс-мажорні чинники.

Відмови першої категорії, як правило, виявляються при обстеженнях будівельних об'єктів і усуваються. Для їх прогнозування використовується параметрична модель відмов «параметр – границя допуску». Їх розподіли в часі  $F(t) = P(T < t)$ , де  $T$  – час (період) роботи конструкції до виникнення відмови, найкраще описуються ймовірнісно-фізичними законами розподілу.

Відмови другої категорії виникають безпосередньо в процесі розвитку аварії. Для прогнозування відмов другої категорії використовуються моделі типу «навантаження - несуча здатність», а їх розподіл в часі практично повторює розподіл зовнішніх ініціюючих подій. У загальному випадку потрібно розглядати відмови першої та другої категорії спільно в рамках однієї моделі. Розроблено алгоритми дослідження відмов конструктивних елементів і конструктивних систем (рис. 9).

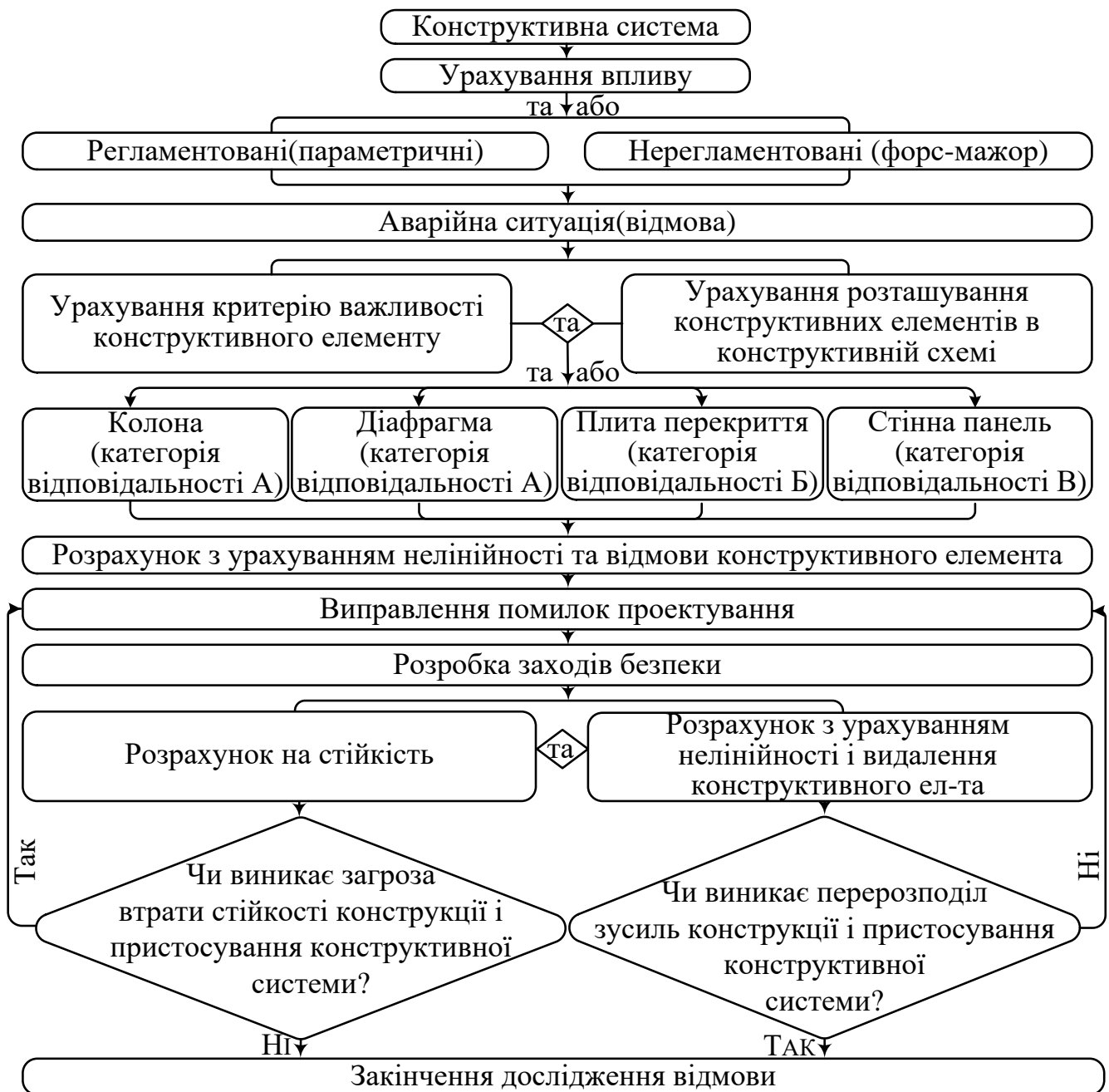


Рис. 9. Алгоритм причинно-наслідкового аналізу відмов для конструктивної системи

У роботах по визначенню фактичної надійності конструкції з урахуванням людського та інших факторів в основі лежить теоретична надійність, яка застосовується априорі.

Автором пропонується чисельний метод визначення теоретичної надійності конструкції, з умов, що ймовірнісні характеристики матеріалів задані гістограмами випадкових чисел, а навантаження – гістограмами випадкових процесів.

Як відомо, під надійністю системи  $P(T)$  розуміється її властивість до збереження якості протягом часу  $T$ . Характеристикою надійності є інтенсивність відмов  $\lambda(t)$ , яка пов'язана з  $P(T)$  відомою формулою

$$P(T) = \exp \left[ - \int_0^T \lambda(t) dt \right], \quad (24)$$

Розглядаються випадки, коли збереження якості обумовлюється незруйновністю конструкції. Конструкцію в цьому випадку можна представити як систему  $R$  (рис. 10), яка характеризується випадковими параметрами  $r_j$  ( $j=1, 2, \dots, m$ ) – фізико-механічні та геометричні властивості; на вході є випадкові процеси  $q_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) – зовнішні впливи, а на виході випадковий процес  $S$  – реакція системи.

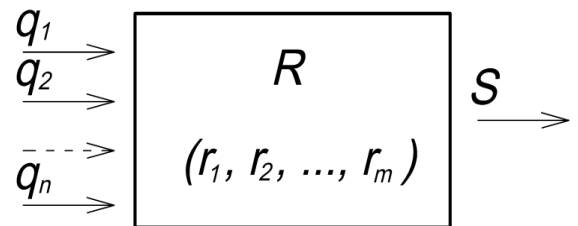


Рис. 10. Схематичне зображення конструктивної системи  $R$

Тоді відмову можна уявити, як викид випадкового процесу  $S(t)$  за пороговий рівень  $Q$ . Запропонований чисельний метод визначення  $P(t)$  заснований на дискретному представленні:

$$P(T) = \exp \left[ - \sum_{l=1}^L \lambda_l \Delta T_l \right] \quad (25)$$

Для визначення  $\lambda_l$  застосовується формула Райса:

$$\lambda_l = \int_{-\infty}^{\infty} P_l(Q, S_l) \dot{S}_l dS, \quad (26)$$

де  $\dot{S}_l$  – похідна від випадкового процесу  $S$  на ділянці  $l$ ;

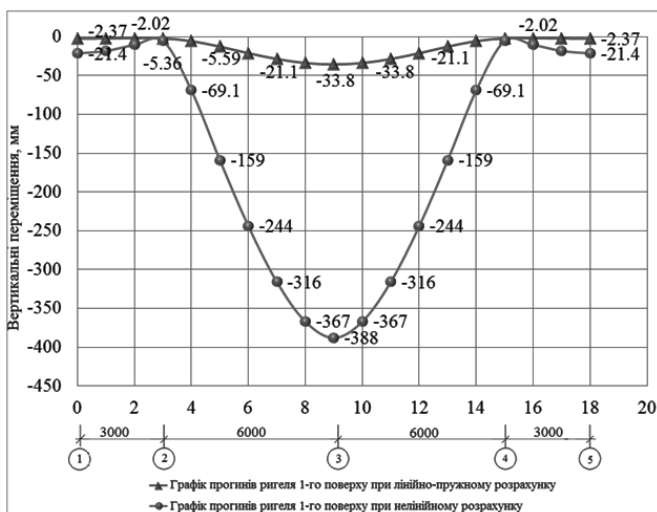
$P_l$  – двовимірний закон розподілу ординати  $Q$  випадкового процесу  $S$  і його похідної  $\dot{S}_l$ .

Запропонований чисельний метод заснований на чисельній реалізації (25) методом Монте-Карло. Наведено приклади визначення  $P(T)$  для статично визначених і статично невизначених систем для різних періодів часу.

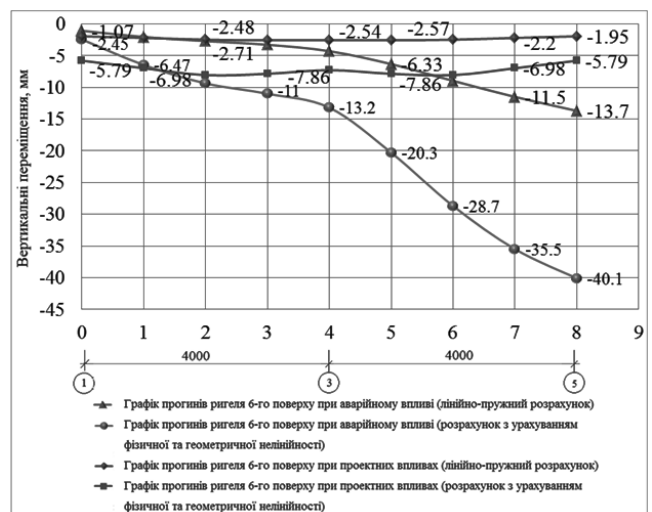
Пропонуються чисельні прийоми методу Монте-Карло (метод виділення головного об'єму, метод антикорельованих вибірок), що дозволяють значно скоротити кількість випробувань і зробити метод Монте-Карло прийнятним для

практичних розрахунків.

Моделювання аварійної ситуації здійснюється на основі чисельного моделювання процесу навантаження. В ході досліджень були розв'язані тестові задачі, в яких моделювався аварійний вихід з ладу несучого вертикального елемента. Моделювання виконувалось у дві стадії. На першій стадії виконується розрахунок конструкції в експлуатаційній стадії або в декількох монтажних і експлуатаційних стадіях, з урахуванням історії зведення та навантажування конструкції, що передують виникненню аварійної ситуації. При цьому враховується фізична і геометрична нелінійність роботи конструкції. Розрахунок проводиться на постійні і тимчасові навантаження, що входять до аварійного сполучення зусиль. Напружено-деформований стан першого етапу є стартовим для другого етапу, на якому виконується розрахунок схеми з врахуванням зруйнованого елемента, видалення якого моделювалося прикладанням зусиль зі зворотнім знаком. Навантаженням на другому етапі є зусилля у видалених елементах, збільшені на коефіцієнт, який враховує динаміку процесу (коефіцієнт динамічності приймається рівним 1.1). Розрахунок також здійснюється в фізично і геометрично нелінійній постановці. Якщо при цьому виявляється, що деякі елементи моделі не задовольняють умові міцності (тобто руйнуються), то розрахунок продовжується аналогічним способом на наступній стадії без таких елементів. Перевірка на міцність елементів, що залишилися, виконується без урахування поздовжнього згину. Розрахунок завершується або локалізацією процесу руйнування, або повним руйнуванням несучої системи. Однак слід зауважити, що у більшості випадків для запобігання «прогресуючого» обвалення конструкції необхідно забезпечити можливість пристосування при початкових аварійних пошкодженнях. Наприклад, доцільно розглядати роботу перекриттів над видаленою колоною (пілоном, стіною) при великих прогинах як висячої залізобетонної оболонки з урахуванням мембранних ефектів обумовлених фізичною та геометричною нелінійністю її роботи. Отримані результати представлені на графіках (рис. 11, а, б).



а



б

Рис. 11. Графіки переміщень ригеля над видаленою колоною,

$a$  – середньою;  $b$  – крайньою

Оцінити реальний НДС при аварійній ситуації можливо тільки при застосуванні методів нелінійного розрахунку.

В основі запропонованого алгоритму моделювання аварійної ситуації (рис.12) лежить вдосконалений кроковий метод.

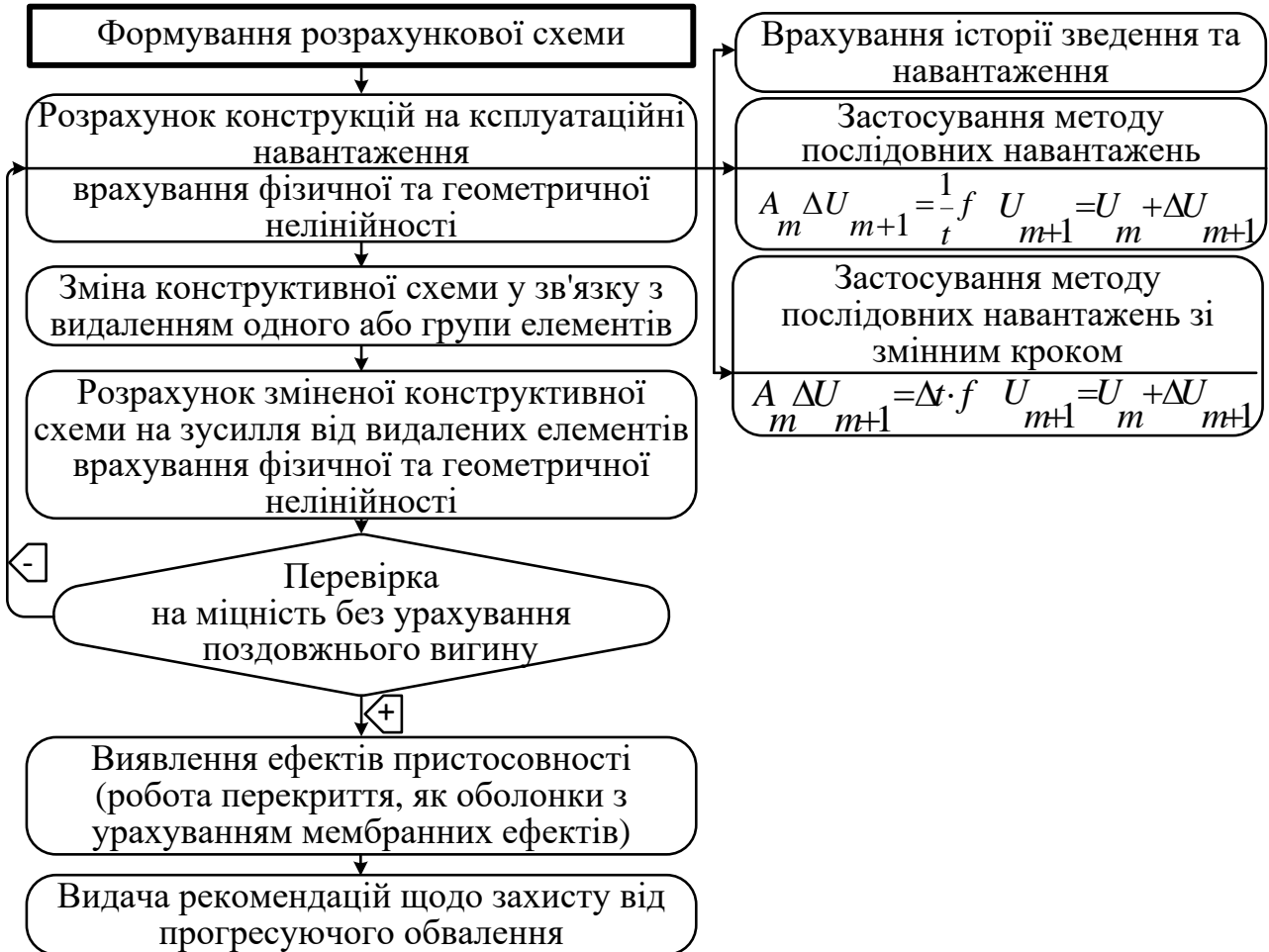


Рис. 12. Алгоритм моделювання аварійної ситуації

Також застосування методів нелінійного розрахунку дозволяє виявити ефекти пристосовуваності конструкцій і розкрити додаткові резерви несучої здатності.

У **шостому розділі** представлені основні принципи реалізації розроблених методів чисельного моделювання процесів життєвого циклу конструкцій: реалізація перетворення «архітектурна модель – аналітична модель – розрахункова схема»; реалізація в рамках набору процесорів розроблених методів вирішення нелінійних задач; реалізація моделювання процесу пристосовуваності конструкцій в рамках розрахунку стійкості до прогресуючого обвалення; реалізація методів аналізу результатів моделювання.

Проведено та обґрунтовано чисельне моделювання процесу зведення ряду реальних будівель і споруд, в тому числі великопрольотне мембранне покриття конькобіжного центру, що включає монтажні та демонтажні стадії; торгово-розважального комплексу зі зміненими в процесі будівництва проектними рішеннями. Розглянуто приклад чисельного моделювання торгово-розважального

комплексу, де в зведеному будинку необхідно було демонтувати частини плит перекриття для установки ескалаторів, раніше не передбачених проектом. Методика моделювання полягала в наступному. Виконувався розрахунок зведеного будинку на експлуатаційні навантаження, потім моделювався процес демонтажу частини перекриттів, виконувався розрахунок з урахуванням демонтажу і навантажень від ескалаторів, не передбачених раніше (рис. 13). Результати аналізу НДС перерізу плити в місці демонтажу і прикладення додаткових навантажень наведені на рис. 14.

З графіків видно, що моделювання процесів зведення (демонтажу) дає очікувані збільшені переміщення (від 15 до 42 %).

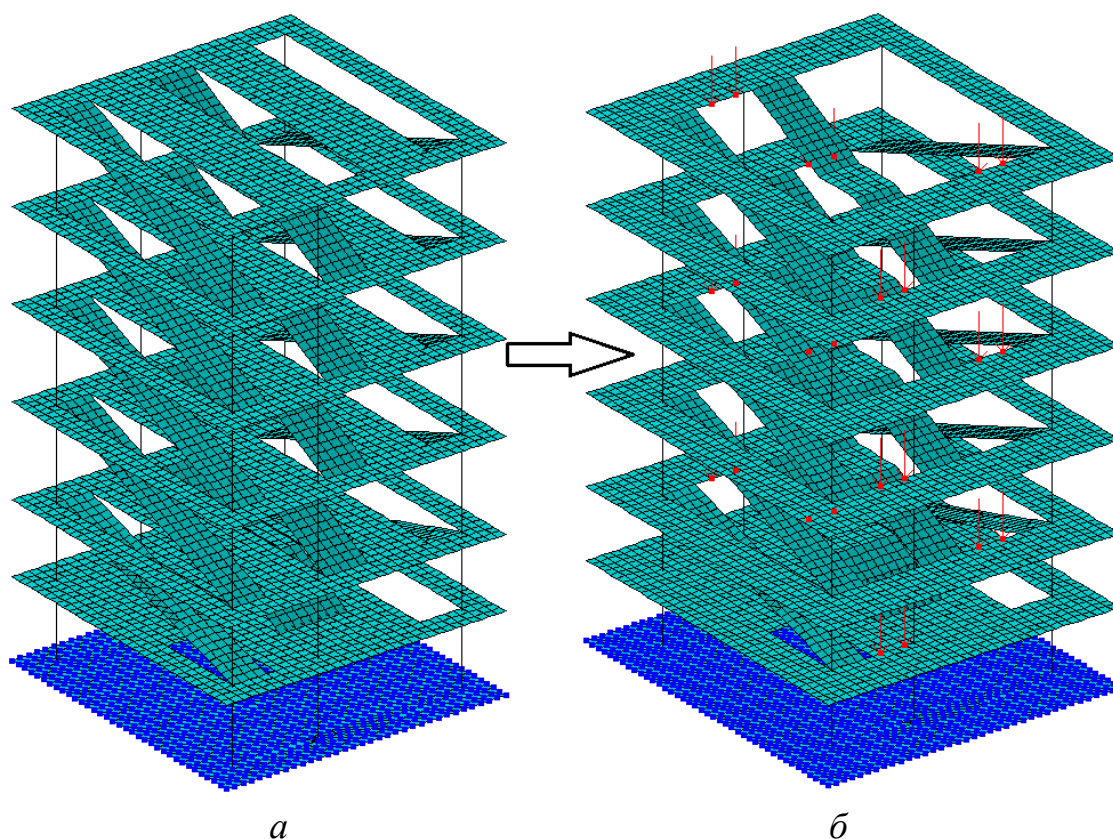


Рис. 13. Фрагмент розрахункової схеми торгово-розважального комплексу, *a* – при наявності плит перекриття; *б* – з демонтованими плитами перекриття

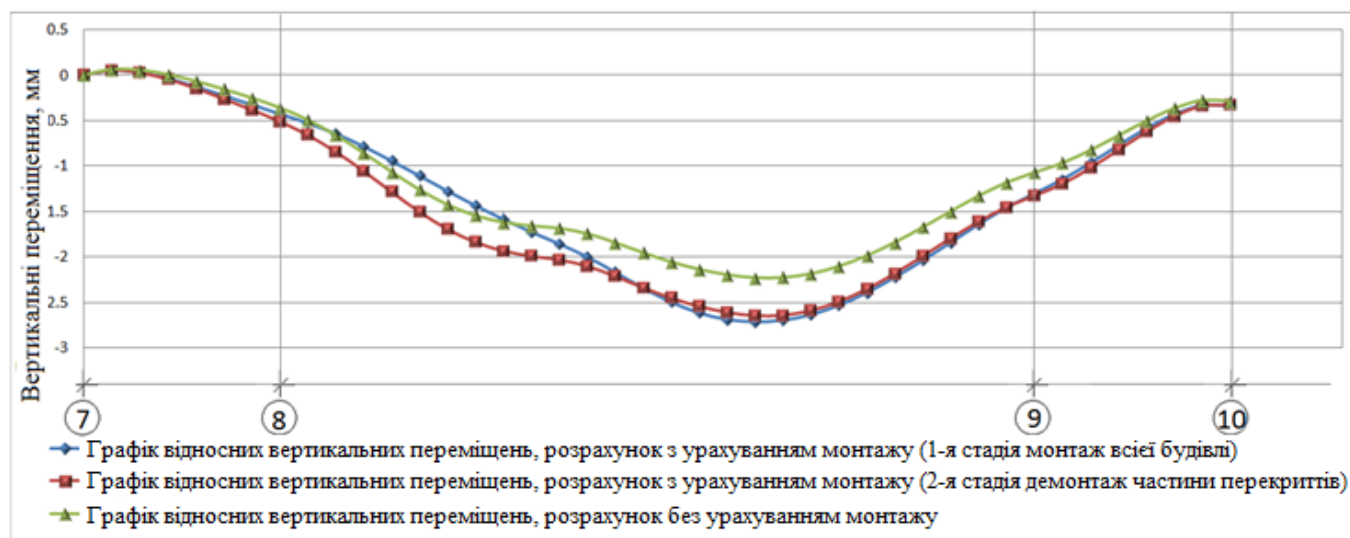


Рис. 14. Графіки відносних вертикальних переміщень у досліджуваній зоні, мм

Проведено чисельні дослідження НДС будівлі торгово-офісного комплексу з виявленими дефектами і тріщинами в процесі будівництва. Реальні характеристики матеріалів досліджуваних колон (129 колон) були введені у розрахункову схему для виконання розрахунку на міцність з урахуванням результатів обстеження. Розрахунок було виконано у нелінійній постановці. При пошкодженні колон виявлено значний перерозподіл зусиль на сусідні конструктивні елементи, при цьому на тих поверхах, де пошкодження значні, це призводить до руйнування неушкоджених елементів. Для визначення коефіцієнта запасу несучої здатності конструктивного елемента обчислюється відношення граничного напруження  $\sigma_{\text{гран}}$  до розрахункового  $\sigma$ :  $s = \sigma_{\text{гран}}/\sigma$ . Виявлено колони, у яких вичерпана несуча здатність. На рис. 15 наведені ізополя відносних переміщень плит перекриттів над зруйнованими конструктивними елементами колон. Порівняння результатів лінійного та нелінійного розрахунку показує, що відносні переміщення, отримані при нелінійному розрахунку, більш ніж в 2 рази більше результатів лінійного розрахунку, що говорить про нелінійний характер роботи плити. Результати натурних обстежень підтверджують ці висновки.

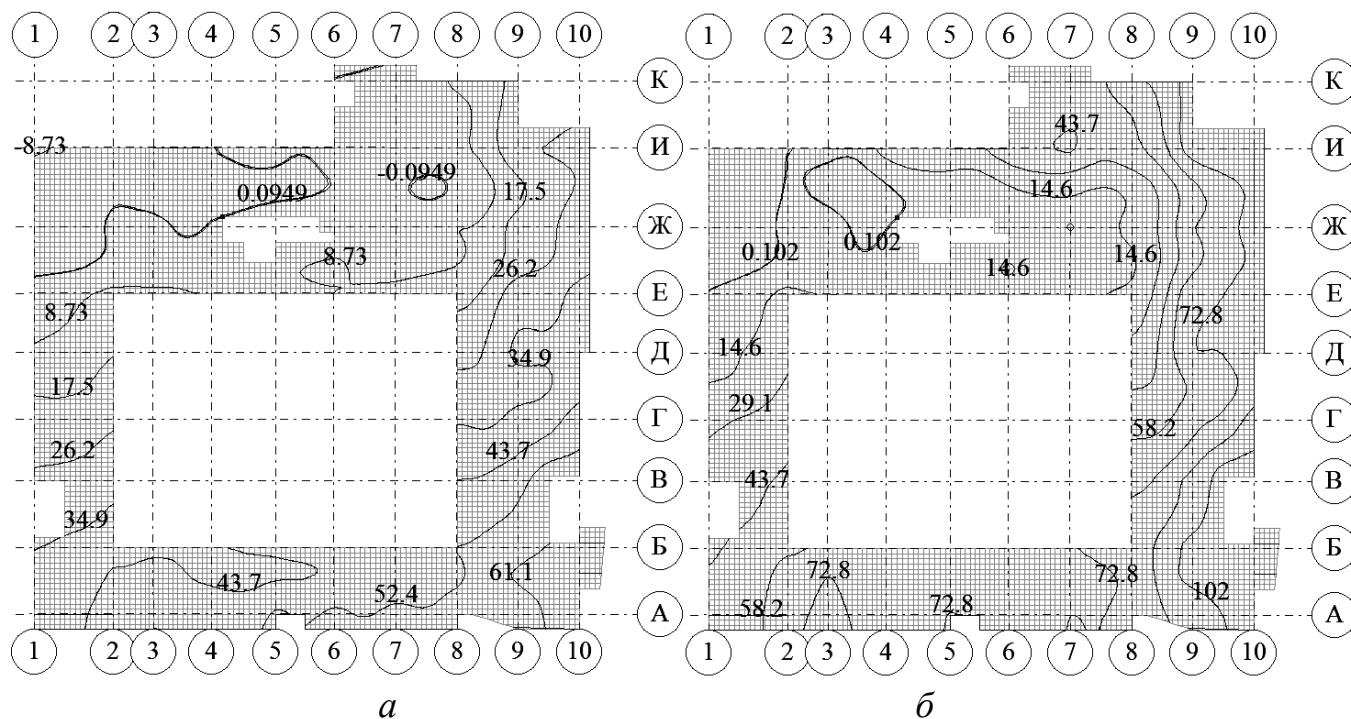


Рис. 15. Ізополя відносних переміщень, *а* – при лінійному розрахунку із заданими проектними жорсткостями; *б* – при нелінійному розрахунку з урахуванням дефектів, тріщин і зруйнованих колон

Для підтвердження адекватності розроблених методів була запропонована чисельно-експериментальна методика, яка полягає в комплексній оцінці факторів, що впливають на НДС конструкцій будівель і споруд на прикладі проектування, зведення й експлуатації висотної 27-ми поверхової будівлі торгово-офісного центру, побудованому на слабких ґрунтах. Розрахункова модель будівлі складена з урахуванням роботи ґрунтового масиву, врахування процесу зведення будівлі, врахування процесу зведення котловану, врахуванні повзучості ґрунту та врахуванні повзучості бетону на початковій стадії експлуатації (стадії стабілізації).

З результатів, отриманих від датчиків моніторингу осадок будівлі,



встановлених на фундаментній плиті, можна відстежити процес розвитку осадок по закінченню будівництва та їх нерівномірний розвиток на плані (рис. 16, 17).

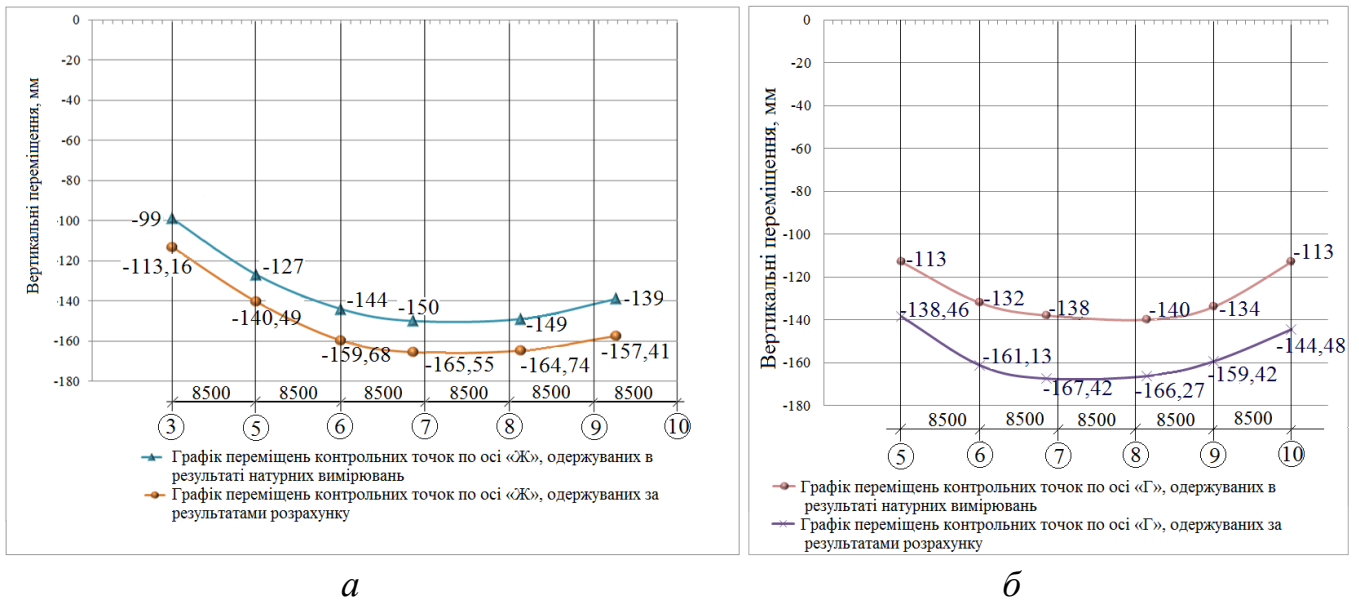


Рис. 16. Графіки оцінки НДС, що враховують деформації фундаментної плити по вісях, згідно МСЕ-розрахунку і результатам моніторингу

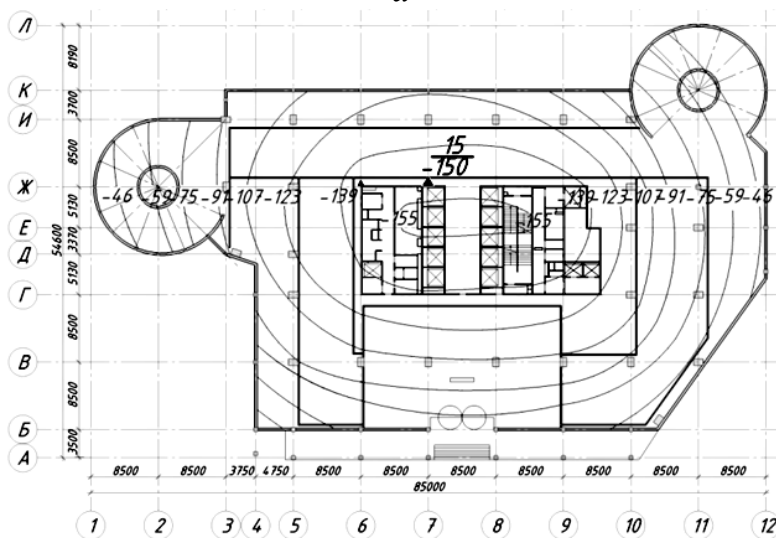
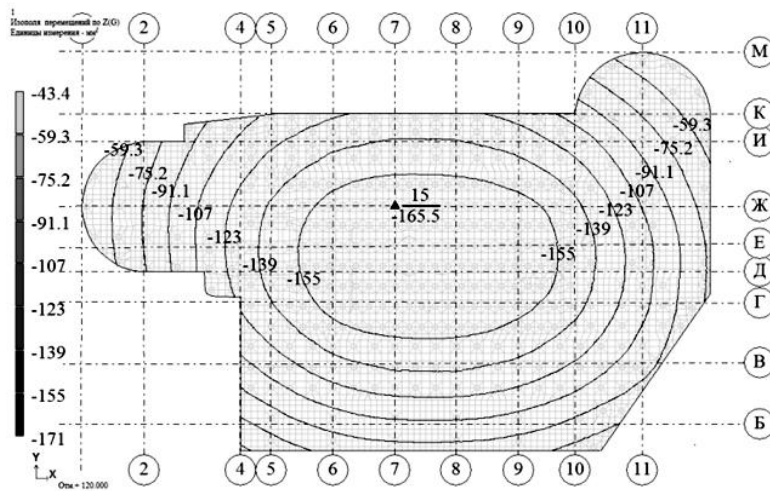




Рис. 17. Результати визначення вертикальних переміщень осадкових марок торгово-офісного центру: *a* – результати чисельного експерименту; *б* – результати моніторингу

Результати проведеного чисельного експерименту за розробленою в дисертаційній роботі методикою за допомогою ПК ЛІРА САПР підтверджують результати моніторингу з похибкою 10,3 %. Нерівномірні деформації основи провокують виникнення додаткових деформацій і зусиль в елементах конструкцій, змінюють їх НДС з плином часу, що призводить до пошкоджень і погіршення технічного стану, як самих конструктивних елементів, так і всієї будівлі в цілому. Чисельне моделювання дозволяє отримати загальну картину НДС конструкцій всієї споруди і підтвердити наявні тенденції розвитку деформацій. Порівняння наявних величин осадок за результатами моніторингу з отриманими результатами чисельного експерименту, згідно побудованим графікам оцінки НДС, що враховують деформації фундаментної плити по вісях, показують збіг 10-25 (%), що дозволяє розробити прогноз подальшого розвитку деформацій.

Про коректність розрахункових моделей та їх відповідність реальному об'єкту свідчать проведені дослідження будівель на експлуатаційній стадії. Чисельний експеримент визначив місця розвитку тріщин та їх напрямлення. Результати чисельного експерименту збіглися з результатами обстеження технічного стану армокам'яних конструкцій житлового будинку (рис. 18).

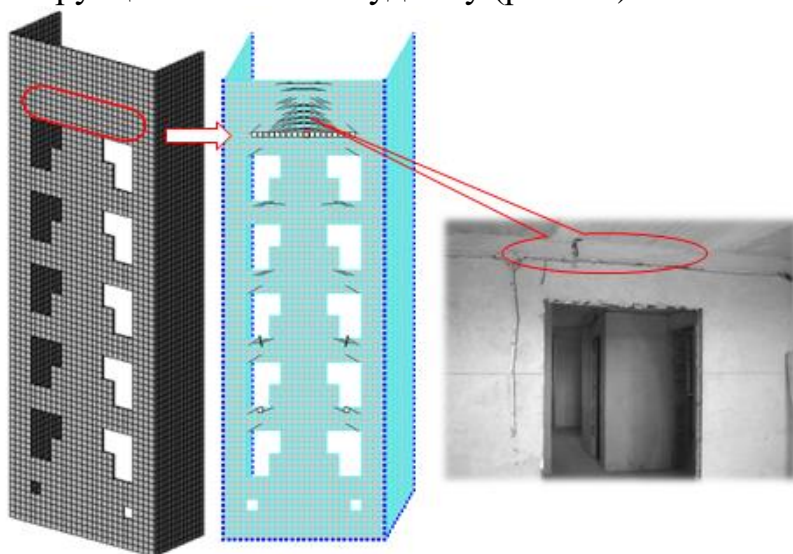


Рис. 18. Результати чисельного експерименту та обстеження технічного стану армокам'яних конструкцій житлового будинку

На підставі цього можна зробити висновок про відповідність розрахункових моделей реальному об'єкту, і про коректність розробленої сукупності методів в дисертаційній роботі по відповідності розрахункових моделей реальному об'єкту.

### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна наукова проблема розробки науково обґрунтованих методів чисельного моделювання напружено-деформованого стану конструкцій з урахуванням стадій їх життєвого циклу,

розробки та реалізації практичних методів розрахунку і проектування будівель і споруд, з урахуванням НДС, що змінюється на стадії їх зведення і на стадії експлуатації. Наукове значення вирішеної проблеми полягає в тому, що вперше створений теоретичний апарат чисельного моделювання будівель і споруд, який дозволяє створити моделі, що відображають їх реальну роботу на всіх стадіях життєвого циклу при різних впливах, в тому числі динамічних і аварійних, з урахуванням просторової роботи «будівля – основа – ґрунт». Прикладне значення роботи полягає в реалізації нових можливостей для об'єктивної оцінки несучої здатності будівель і споруд на всіх стадіях їх життєвого циклу. На основі застосування системного підходу, ідей і методів математичного моделювання в роботі створені математичні моделі, методи та алгоритми які реалізовані в програмному комплексі ЛПРА-САПР, застосування якого дозволяє істотно вдосконалити процес проектування об'єктів будівництва в Україні та за її межами.

На основі виконаного дослідження сформульовано такі висновки та пропозиції:

1. Аналіз вітчизняних і зарубіжних джерел, нормативної документації, а також практики проектування будівель і споруд показав, що існуючі практично реалізовані моделі та методи розрахунку будівель і споруд не повною мірою враховують спільну просторову роботу конструкцій, і не враховують процеси, що змінюють НДС в часі, а також особливості поведінки конструкцій на кожній стадії їх життєвого циклу. Інформація, наявна в цій галузі досліджень, часто носить емпіричний характер. В рамках вирішеної проблеми виконано обґрунтування необхідності врахування зміни НДС протягом життєвого циклу вже на стадії проектування.

2. Сформульована науково-обґрунтована концепція проектування будівель і споруд на основі чисельних моделей будівель, споруд та процесів, що відбуваються в конструкціях при дії навантажень і впливів на протязі їх життєвого циклу.

3. Узагальнені аналітичні залежності для визначення адекватних параметрів конструктивних систем при інтеграції на стадії проектування. Розроблена низка моделей для розрахунку і проектування будівель і споруд у просторовій постановці.

4. Виконане моделювання процесів життєвого циклу будівель і споруд та проведені чисельні експерименти дозволили встановити значний вплив на напружено-деформований стан конструкцій будівель і споруд процесу зведення, процесу навантаження, реологічних процесів і обґрунтувати концепцію необхідності врахування зміни НДС на стадіях ЖЦ при проектуванні.

5. Розроблений новий метод диференційних жорсткостей дозволяє врахувати нелінійні властивості матеріалу при проектуванні на основі вдосконаленого методу метод січних. Отримали подальший розвиток методи нелінійного аналізу та проектування складних просторових конструктивних систем.

6. Розроблений комплекс методів, що дозволяють проаналізувати напружено-

деформований стан конструкцій, які змінюється в часі, по мірі поетапного зростання навантаження, що забезпечують живучість і пристосовуваність конструкцій на всіх стадіях життєвого циклу. Запропонована методика і алгоритм моделювання аварійної ситуації на основі розробленого методу послідовних навантажень, що дозволить більш обґрунтовано проектувати будівлі і споруди при проектних та запроектних впливах і мінімізувати відмови, що призводять до аварійної ситуації, або кількість локальних руйнувань у конструктивних системах.

7. Розроблені та реалізовані ефективні алгоритми та програмне забезпечення для аналізу станів складних просторових систем при силових і деформаційних навантаженнях з урахуванням процесу зведення, з урахуванням процесу повзучості бетону на стадії зведення і на стадії експлуатації, з урахуванням процесу пристосовуваності конструкцій при аварійних ситуаціях.

8. На основі розроблених алгоритмів створені модулі програмного комплексу ЛІРА-САПР, що дозволяють виконувати моделювання процесів життєвого циклу будівель і споруд з урахуванням нелінійної роботи несучих конструктивних елементів і відобразити їх реальний напружено-деформований стан. Проведені чисельні дослідження та порівняльний аналіз з даними натурних випробувань зведених об'єктів. Виконано порівняння результатів розрахунку по розробленій методиці з результатами вимірювань за допомогою датчиків, встановлених на досліджуваному об'єкті та отримано збіг 90 %.

9. Розроблена методика визначення теоретичної ймовірності відмови конструктивного елемента і метод визначення ймовірності руйнування конструктивних систем з використанням принципів кваліметрії. Запропонована нова модифікація методу Монте-Карло, що дозволяє визначати теоретичну надійність конструкції практично доступними засобами. Навантаження трактуються, як випадкові процеси, а міцнісні характеристики матеріалу, як випадкові величини, що задані теоретичними функціями розподілу або безпосередньо гістограмами.

10. Запропонована нова технологія розрахунку конструкцій, заснована на чисельному моделюванні процесів життєвого циклу конструкцій.

Здійснена апробація запропонованих підходів, моделей, прикладних методик і програмного комплексу для оцінки несучої здатності і деформативності будівель і споруд. Розроблені пропозиції та рекомендації були використані при науково-технічному супроводі проектування і зведення будівель і споруд. Достовірність підтверджена практичними результатами застосування при проектуванні висотних і унікальних будівель в м. Києві та в інших регіонах України та країн СНД. Ефективність впровадження полягає у підвищенні конструктивної безпеки будівель і споруд високого класу відповідальності. Результати досліджень були використані при розробці Державних нормативних документів.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Барабаш М. С. Анализ проблем безопасности строительных объектов в районах высокой сейсмичности / М. С. Барабаш, В. П. Максименко, Л. В. Филинский // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво) // ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. – К. : ДП НДІБК, 2012, ТОВ «Видавництво СТАЛЬ», 2012. – № 76 – С. 222–229.
2. Барабаш М. С., Ромашкина М.А. Алгоритм моделирования и расчета конструкций с учетом ползучести бетона / М.С. Барабаш, М.А. Ромашкина // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, Vol. 10, Issue 2. – М. : Изд-во «АСВ», 2014, с. 56–64.
3. Барабаш М. С. Аналіз моделей ґрунтового середовища з метою визначення способу підсилення основи конструкції та коректне завдання її розрахункової схеми в ПК ЛІРА / М. С. Барабаш, С. М. Хоптинець, С. В. Дідух // Науково-виробничий журнал: Будівництво України. –2009. – № 6. – С. 34–38.
4. 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.
5. Барабаш М. С. Аналіз основних проблем проектування багатофункціональних висотних будівель / М. С. Барабаш, А. В. Дзюба // Науково-виробничий журнал: Будівництво України. – К. : ДНДІАСБ, 2007. – № 10. – С. 38–40.
6. Барабаш М. С. Аналіз способів моделювання стику безребристої, безкапітальної залізобетонної плити та колони / М. С. Барабаш, Є. В. Омельченко // Науковий журнал: Вісник НАУ. – К. : НАУ, 2009 – № 3. – С. 160–166.
7. Барабаш М. С. Архітектурно-будівельне проектування об'єкта будівництва на основі моделювання його життєвого циклу / Марія Сергіївна Барабаш // Проблеми розвитку міського середовища: Наук.-техн. збірник. – К.: НАУ, 2013. – № 9. – С. 27 - 34.
8. Барабаш М. С. Влияние процесса возведения на пространственную работу несущих систем зданий / Мария Сергеевна Барабаш // Строительство, материаловедение, машиностроение // Сб. научн. Трудов. – Дн-вск: ПГАСА, 2012. – № 65. – С. 29–34.
9. Барабаш М. С. Вопросы интеграции программных комплексов на основе информационно-логической модели строительного объекта. / Мария Сергеевна Барабаш // Строительство, материаловедение, машиностроение // Сб. научн. трудов. – Дн-вск, ПГАСА, 2006. – № 37. – С. 29–35.
10. Барабаш М. С. Учет нелинейной работы железобетонных конструкций в практических расчетах / М. С. Барабаш, А. С. Городецкий // Строительство, материаловедение, машиностроение // Сб. научн. Трудов. – Дн-вск: ПГАСА, 2014. – Вып. 77. – С. 54–59.
11. Барабаш М. С. Дослідження сумісної роботи фундаментної плити з палями / М. С. Барабаш, М. О. Бут, Р. В. Остапенко // Науково-виробничий журнал:

Будівництво України. – К. : ДНДІАСБ, 2007 – № 6. – С. 40–43.

12. Барабаш М. С. Дуальное представление моделей архитектурно-конструктивных элементов в САПР объектов строительства и архитектуры / М. С. Барабаш, О. І. Палиєнко // Строительство, материаловедение, машиностроение // Сб. научн. Трудов. – Дн-вск: ПГАСА, 2011. – Вып. 61. – С.33–38.

13. Барабаш М. С. Программные комплексы САПФИР и ЛИРА-САПР – основа отечественных BIM-технологий: Монография /М. С. Барабаш, О. И. Палиенко, Д. В. Медведенко. – 2-е изд. – М. : Юрайт, 2013. – 366 с.

14. Барабаш М. С. Исследование вопросов живучести строительных конструкций при аварийных воздействиях / М. С. Барабаш, А. С. Городецкий // Строительство, материаловедение, машиностроение // Сб. научн. Трудов. – Дн-вск: ПГАСА, 2010. – № 56. – С. 123–128.

15. Барабаш М. С. Исследование устойчивости конструкций зданий и сооружений к прогрессирующему разрушению при аварийных воздействиях / М. С. Барабаш, А. С. Городецкий О.С. // Науково-технічний журнал: Нові технології в будівництві. – 2010. – № 2(20). – С. 19–23.

16. Барабаш М. С. Классификация этапов жизненного цикла объекта строительства / Мария Сергеевна Барабаш // Строительство, материаловедение, машиностроение // Сб. научн. Трудов. – Дн-вск: ПГАСА, 2013. – Вып. 69. – С. 48–52.

17. Барабаш М. С. Комп'ютерні технології проектування металевих конструкцій / М. С. Барабаш, С. В. Козлов, Д. В. Медведенко. – К. : НАУ, 2012. – 572 с.

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

19. Барабаш М. С. Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла конструкций / М. С. Барабаш, Ю. В. Гензерський // Містобудування та територіальне планування: Наук-техн. збірник. – К. : КНУБА, 2013. – № 47. – С. 83–89.

20. Барабаш М. С. Компьютерное моделирование уникальных строительных объектов средствами программных комплексов семейства ЛИРА / Мария Сергеевна Барабаш // Науково-виробничий журнал: Будівництво України. – 2012. – № 4 – С. 25–32.

21. Барабаш М. С. Методи експертних оцінок при автоматизованому проектуванні нетипових конструкцій / М. С. Барабаш, Т. В. Тугай // Науковий журнал: Вісник НАУ. – К. : НАУ, 2005 – № 3. – С. 151–156.

22. 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.

23. Барабаш М. С. Методи розрахунку та дослідження напружено-деформованого стану плитно-палевих протизсувних конструкцій / М. С. Барабаш, М. В. Михальчук // Науково-виробничий журнал: Будівництво України. – 2010. – № 4. – С. 37–41.

24. Барабаш М. С. Методы автоматизации моделирования и анализа свойств проектируемого объекта / Мария Сергеевна Барабаш // Строительство, материаловедение, машиностроение // Сб. научн. трудов. – Дн-вск: ПГАСА, 2008. – № 47. – С. 52–58.

25. Барабаш М. С. Методы и технология проектирования с учетом прогрессирующего обрушения / Мария Сергеевна Барабаш // Научно-технический журнал «Строительство». – Тбилиси, 2013. – № 4(31). – С. 6–11.

26. Барабаш М. С. Методы моделирования изменения напряженно-деформированного состояния конструкций во времени / Мария Сергеевна Барабаш // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, Vol. 9, Issue 4. – М. : Изд-во «АСВ», 2013. – С. 92–100.

27. Барабаш М. С. Методы проектирования объектов строительства на базе BIM-технологий / М. С. Барабаш, Я. В. Башинский // Проблеми розвитку міського середовища: Наук.-техн. збірник. – К. : НАУ, 2012. – № 7. – С. 22–28.

28. Барабаш М. С. Моделирование жизненного цикла конструкций высотных зданий с учетом сопротивляемости прогрессирующему разрушению / Мария Сергеевна Барабаш // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering – М.: Изд-во «АСВ», 2013. Vol. 9, Issue 4. – С. 101–106.

29. Барабаш М. С. Некоторые аспекты расчета зданий на устойчивость к прогрессирующему разрушению / М. С. Барабаш, А. С. Городецкий // Строительство, материаловедение, машиностроение // Сб. научн. Трудов. – Дн-вск: ПГАСА, 2009. – № 50. – С. 157–162.

30. 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. трудов Международного научного семинара 19–20 сентября 2013 г. – Курск, 2013. – С. 73–83.

31. Барабаш М. С. Організація технології інтеграції систем автоматизованого проектування на базі КАЛІПСО / М. С. Барабаш, А. В. Терещенко // Науково-виробничий журнал: Будівництво України. – К. : ДНДІАСБ, 2007. – № 4. – С. 40–44.

32. Барабаш М. С. Особливості моделювання висотних будівель з урахуванням впливу динамічних навантажень / М. С. Барабаш, І. О. Усольцев // Науково-виробничий журнал: Будівництво України. – 2012. – № 1 – С. 24–28.

33. Барабаш М. С. Применение интеллектуальных систем для автоматизированного расчета и проектирования железобетонных конструкций / М. С. Барабаш // Строительство, материаловедение, машиностроение // Сб. научн. трудов. – Дн-вск, ПГАСА, 2007. – № 43. – С. 43–47.

34. Барабаш М. С. Рекомендации по моделированию конструкций высотных зданий с учетом сопротивляемости прогрессирующему разрушению / Мария Сергеевна Барабаш // Научно-технический журнал «Строительство». – Тбилиси, 2014. – № 1(32). – С. 6–11.

35. Барабаш М. С. Способы численного моделирования узлов перекрытия с колоннами / М. С. Барабаш, П. І. Шпак // Науково-виробничий журнал: Будівництво України. – 2011. – № 5. – С. 38–41.

36. Барабаш М. С. Численное моделирование воздействия динамических нагрузок метрополитена на близстоящие здания / М.С. Барабаш, Ю.В. Гензерський, В. Овчарова // Містобудування та територіальне планування: Наук.-техн. збірник. – К., КНУБА, 2013. – Вип. 48. – С. 46–52.

37. Барабаш М. С. Численное моделирование НДС конструкций с учетом стадий жизненного цикла зданий и сооружений / Мария Сергеевна Барабаш //

Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений: тезисы докладов V-го Международного симпозиума (Иркутск, 01-06 июля, 2014 г.). – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. – С. 34–36.

38. Барабаш М. С. Методи комп'ютерного моделювання для розрахунку сталезалізобетонних плит перекриття / М. С. Барабаш, О. І. Лапенко // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – ПолНТУ, 2012. – С. 12–17.

39. Барабаш М. С. Методы компьютерного моделирования процессов возведения высотных зданий / Мария Сергеевна Барабаш // Промышленное и гражданское строительство: Научно-технический и производственный журнал. – Москва. 2014. – № 3. – С. 40–44.

40. Городецкий А. С. Компьютерное моделирование процесса возведения строительных конструкций / А. С. Городецкий, М. С. Барабаш // Строительная механика и расчет сооружений: Научно-технический журнал. – Москва: ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, 2014. – Вып. 5 (256). – С. 28–33.

41. Barabash M. Estimation metro influence on structure adjacent buildings/ M. Barabash // Materials of International Conference Seismics-2014 “Seismic resistance and rehabilitation of buildings”, 29–30 May 2014, Tbilisi, Georgia. – P. 141–151

42. Barabash M. Stress strain state estimation of underground parking by numerical modeling / M. Barabash, A. Roman, M. Stankiewicz // Future of Lithuania”. Transport engineering and management // Proceeding of the 16th Conference for Junior Researches “Science. – Vilnius, Lithuania, 8 May 2013. – P. 199–204.

43. Барабаш М. С. Информационные технологии интеграции на основе программного комплекса САПФИР: Монография / М. С. Барабаш, В. В. Бойченко, О. И. Палиенко. – К. : Изд-во «Сталь», 2012. – 485 с.

### **Авторські свідоцтва**

1. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №55503 Комп'ютерна програма «Програмний комплекс «ЛІРА САПР 2014» (ПК«ЛІРА САПР 2014») /Городецький Олександр Сергійович, Гензерський Юрій Валерійович, Медведенко Дмитро Вячеславович, Барабаш Марія Сергіївна, Буфіус Ольга Ігоревна, Батрак Лариса Григорівна, Маснуха Олександр Михайлович; 04.07.2014 р.

2. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 55504 Комп'ютерна програма «САПФИР-2014» / Бойченко Віталій Вадимович, Шут Олександр Олександрович, Палієнко Олег Ігоревич, Барабаш Марія Сергіївна; 04.07.2014 р.

3. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 38886 Комп'ютерна програма «ВІЗОР-САПР» /Городецький Олександр Сергійович, Барабаш Марія Сергіївна, Буфіус Ольга Ігоревна, Гензерський Юрій Валерійович, Городецький Дмитро Олександрович; 25.06.2011 р.

4. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 24921 Комп'ютерна програма « Програмний комплекс КАЛПСО (Комп'ютерна автоматизована лінія проектування будівельних об'єктів – Комп'ютерна автоматизована лінія проєктирования строительных объектов)» / Барабаш Марія Сергіївна, Городецький Олександр Сергійович, Печенов Сергій Леонардович, Бородавка Євген Володимирович, Коба Сергій Денисович; 08.07.2008 р.

5. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 38883 Комп'ютерна програма «СТК-САПР»/ Городецький Олександр Сергійович, Медведенко Дмитро Вячеславович, Барабаш Марія Сергіївна; 25.06.2011 р.

### **АНОТАЦІЯ**

**Барабаш М.С. Чисельне моделювання напружено-деформованого стану конструкцій з урахуванням стадій життєвого циклу будівель та споруд. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Національний авіаційний університет Міністерства освіти і науки України, Київ, 2014.

Дисертація присвячена вирішенню наукової проблеми, що полягає в створенні нового перспективного напрямку моделювання конструкцій будівель і споруд з урахуванням їх просторової роботи та зміни напружено-деформованого стану на кожній стадії життєвого циклу.

Розроблено вперше теоретичне обґрунтування концепції проектування будівель і споруд на основі математичних моделей нелінійної роботи конструкцій, розроблені співвідношення для реалізації особливостей процесу навантаження конструктивно та фізично нелінійних систем конструкцій. Розроблено новий теоретичний апарат, який реалізує основні закономірності нелінійного деформування конструкцій будівель і споруд, враховує нелінійну роботу конструкцій при зведенні, з урахуванням повзучості бетону та пристосованості конструкцій до за проектних навантажень. Запропоновано інженерну методику розрахунку з врахуванням фізичної нелінійності матеріалу конструкцій. Розроблено нову технологію моделювання та розрахунку будівель і споруд з урахуванням реальної роботи конструкцій на всіх стадіях життєвого циклу, що враховує зміну НДС, реологічні властивості матеріалів і аварійні ситуації. Запропоновані концепції чисельного моделювання процесів життєвого циклу: процесу зведення, процесу навантажування з урахуванням розвитку тріщин, процесу поведінки конструкції в часі з урахуванням реологічних властивостей матеріалу, процесу пристосовуваності конструкцій при запроектованих впливах. Удосконалено методи визначення теоретичної та фактичної ймовірності руйнування конструктивних елементів і конструктивних систем на основі методів статистичного моделювання.

**Ключові слова:** будівлі та споруди, життєвий цикл, процес зведення, попередні деформації, напружено-деформований стан, повзучість бетону, чисельне моделювання, адекватність, деформована схема, комп'ютерні технології, інтеграція, аналітична модель

### **АННОТАЦИЯ**

**Барабаш М.С. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния конструкций с учетом стадий жизненного цикла зданий и сооружений. – Рукопись.**

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения. – Национальный авиационный университет Министерства образования и науки Украины, Киев, 2014.

Диссертация посвящена решению научной проблемы, состоящей в создании



нового перспективного направления моделирования конструкций зданий и сооружений с учетом их пространственной работы и изменения напряженно-деформированного состояния на каждой стадии жизненного цикла.

Разработано впервые теоретическое обоснование концепции проектирования зданий и сооружений на основе математических моделей нелинейной работы конструкций, разработаны соотношения для реализации особенностей процесса нагружения конструктивно и физически нелинейных систем конструкций. Разработан новый теоретический аппарат, реализующий основные закономерности нелинейного деформирования конструкций зданий и сооружений, учитывающий нелинейную работу конструкций при возведении, реологические свойства бетона и приспособляемость конструкций к запроектным нагрузкам. Предложена инженерная методика расчета конструкций с учетом физической нелинейности материала. Разработана новая технология моделирования и расчета зданий и сооружений с учетом реальной работы конструкций на всех стадиях жизненного цикла, учитывающая изменение НДС, реологические свойства материалов и аварийные ситуации. Предложены концепции численного моделирования процессов жизненного цикла: процесса возведения, процесса нагружения с учетом развития трещин, процесса поведения конструкции во времени с учетом реологических свойств материала, процесса приспособляемости конструкций при запроектных воздействиях. Усовершенствованы методы определения теоретической и фактической вероятности разрушения конструктивных элементов и конструктивных систем на основе методов статистического моделирования.

Практическое значение работы определяется тем, что результаты исследования позволяют определить реальное напряженно-деформированное состояние конструкций с учетом его изменения на всех стадиях жизненного цикла, что приведет к повышению качества проектирования, обеспечению конструкционной безопасности при экономии материалов. Разработанный метод расчета конструкций – «метод дифференциальных жесткостей» позволяет в практических расчетах на стадии проектирования учитывать физическую нелинейность материала. Разработаны рекомендации по проектированию конструктивных систем зданий и сооружений с учетом приспособляемости конструкций к внезапным запроектным воздействиям. Разработаны рекомендации по проектированию конструктивных систем зданий и сооружений с учетом процесса возведения. Разработана методика моделирования конструктивных систем каркасно-монолитных зданий с учетом эффектов ползучести бетона.

Полученные практические результаты исследований обеспечили возможность применения экономичных и надежных проектно-конструкторских решений для зданий и сооружений. Результаты внедрены в государственные нормы Украины. Методы и алгоритмы реализованы в программных комплексах ЛИРА-САПР, САПФИР и др., которые внедрены в практику проектирования во все проектные организации Украины, а также стран ближнего и дальнего зарубежья.

**Ключевые слова:** здания и сооружения, жизненный цикл, процесс возведения, напряженно-деформированное состояние, ползучесть бетона, численное моделирование, адекватность, деформирована схема, компьютерные технологии, интеграция, аналитическая модель

### **ABSTRACT**

**Barabash M.S. Numerical simulation of the stress-strain state of structures considering life cycle of buildings.** – Manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of technical sciences, on specialty 05.23.01 - building structures, buildings and constructions. - National Aviation University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2014.

Dissertation is focused upon new promising technique for simulation of buildings and structures with account of their 3D behaviour and stress strain state at every stage of their life cycle. For the first time, theoretical justification for the design concept of buildings and structures is presented based on mathematical models of nonlinear behaviour of structures. The research also presents ratios for implementation of peculiar features in loading of structurally and physically nonlinear structures. The author demonstrates new theoretical approach that realizes basic laws of nonlinear strain in building structures; the approach also considers nonlinear behaviour of structures during erection, rheological properties of concrete and adaptability of structures to real loads. Engineering procedure for analysis of structures with account of physical nonlinearity of material is suggested. New technology for simulation and analysis of buildings and structures with account of real behaviour of structures at all stages of life cycle is described; the technology also considers modifications in stress strain state, rheological properties of materials and emergency situations. The author proposes concepts for numerical simulation of life cycle, such as erection, loading with account of crack propagation, behaviour of structure in time with account of rheological properties of materials, adaptability of structure to real loads. The research also presents enhanced methods for determining theoretical and actual probability for destruction of structural elements and structural systems based on static simulation methods.

**Keywords:** buildings and structures, life cycle, erection, stress strain state, creep of concrete, numerical simulation, adequacy, deformed shape, computer technology, integration, analytical model.

Підп. до друку 22.10.2014. Формат 60x84/16. Папір офс.  
Офс. друк. Ум. друк. арк. 2,32. Обл.-вид. арк. 2,5.  
Тираж 100 пр. Замовлення № 205-1.

Видавець і виготівник  
Національний авіаційний університет  
03680. Київ – 58, проспект Космонавта Комарова, 1

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 977 від 05.07.2002