

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»

**Погрібний Володимир Володимирович**



УДК 624.012/.07:539.375

**МЕТОДОЛОГІЯ ОЦІНЮВАННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ  
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ І КАМ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ  
З ВИКОРИСТАННЯМ УМОВ ЕКСТРЕМУМУ ДЕФОРМУВАННЯ**

Спеціальність 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди  
Галузь знань 19 – Архітектура та будівництво

Реферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Полтава – 2024

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор  
**Павліков Андрій Миколайович**,  
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», завідувач кафедри будівельних конструкцій.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Ватуля Гліб Леонідович**,  
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова Міністерства освіти і науки України, заступник директора з наукової роботи навчально-наукового інституту будівельної та цивільної інженерії;

доктор технічних наук, професор  
**Нікіфорова Тетяна Дмитрівна**,  
Український державний університет науки і технологій Міністерства освіти і науки України, декан будівельного факультету Навчально-наукового інституту «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»;

доктор технічних наук, професор  
**Яковенко Ігор Анатолійович**,  
Національний університет біоресурсів і природокористування України Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри будівництва.

Захист дисертації відбудеться «19» листопада 2024 року, о 11<sup>30</sup>, на засіданні спеціалізованої вченої ради Д44.052.02 при Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» за адресою: 36011, м. Полтава, проспект Першотравневий, 24, ауд. 218.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» за адресою: 36011, м. Полтава, проспект Першотравневий, 24 та на сайті:

<https://nupp.edu.ua/page/spetsializovani-vcheni-radi-po-zakhistu-disertatsij.html>

Реферат розісланий: «18» жовтня 2024 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Т.А. Галінська

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В існуючих методах оцінювання несучої здатності бетонних, залізобетонних, кам'яних і армокам'яних конструкцій та опору їх елементів широко розповсюджені емпіричні залежності з областями застосування, обмеженими умовами експериментів. Перенесення розрахункових формул на інші, навіть наближені випадки, може привести до суттєвих неточностей. Разом із тим, у дослідях встановлюється специфіка поведінки конструкцій у граничному стані, що дозволяє обґрунтовано використовувати відповідні принципи, методи та концепції механіки деформівного твердого тіла, зокрема теорії пластичності, в якості загальної теоретичної основи для створення методології розрахунків.

Обережне застосування теорії пластичності до бетону та кам'яної кладки пов'язане з обмеженими їх пластичними властивостями. Однак, виходячи з класичного розуміння, зсув реалізується лише за наявності на поверхні руйнування інтенсивної направленої деформації, що засвідчується експериментально. При домінуванні напружень стиску умову міцності бетону або кам'яної кладки можливо розглядати як умову пластичності, застосовувати для розв'язання задач несучої здатності конструкцій й опору їх елементів математичний апарат теорії пластичності та варіаційне числення, що мають достатньо просту форму реалізації. Пластична деформація локалізується у тонких стиснутих шарах на поверхні руйнування конструкцій та їх елементів.

Останнім часом широкого розповсюдження в розрахунках набула нелінійна деформаційна модель. Одним із визначальних параметрів моделі є відносна гранична деформація стиску бетону та кам'яної кладки, встановлена експериментально або з використанням екстремальних критеріїв силових параметрів. Її значення змінюється в широкому інтервалі та потребує уточнення. При застосуванні поздовжньої високоміцної арматури втрата несучої здатності балкових конструкцій за нормальним перерізом відбувається як за досягнення напруженнями в арматурі міцності на розтяг, так і при рівні деформації стиску, що перевищує межу «деструктуризації» і бетон чи кладка руйнуються за стиснутою зоною. Останнє має місце і для переармованих конструкцій.

Вказане обґрунтовує можливість застосування у якості загальної теоретичної основи для визначення несучої здатності залізобетонних і кам'яних конструкцій умов екстремуму деформування: мінімуму потужності пластичної деформації при зсуві та розривних рішеннях на основі принципу віртуальних швидкостей та максимуму деформування без «макродеструктуризації», що використовується для розрахунків конструкцій за нормальними перерізами.

Таким чином, дисертаційна робота присвячена вирішенню **актуальної науково-технічної проблеми** оцінювання несучої здатності залізобетонних і кам'яних конструкцій на основі використання умов екстремуму деформування і має важливе теоретичне та практичне значення для проєктування балкових залізобетонних і армокам'яних конструкцій, коротких залізобетонних консолей, бетонних та кам'яних опор при місцевому стиску, цегляних стін за сумісної дії вертикального і горизонтального (сейсмічного) навантаження, удосконалення їх конструктивних рішень та підвищення експлуатаційної придатності.

Дослідження проводилися за двома основними напрямками, наведеними на рис. 1.

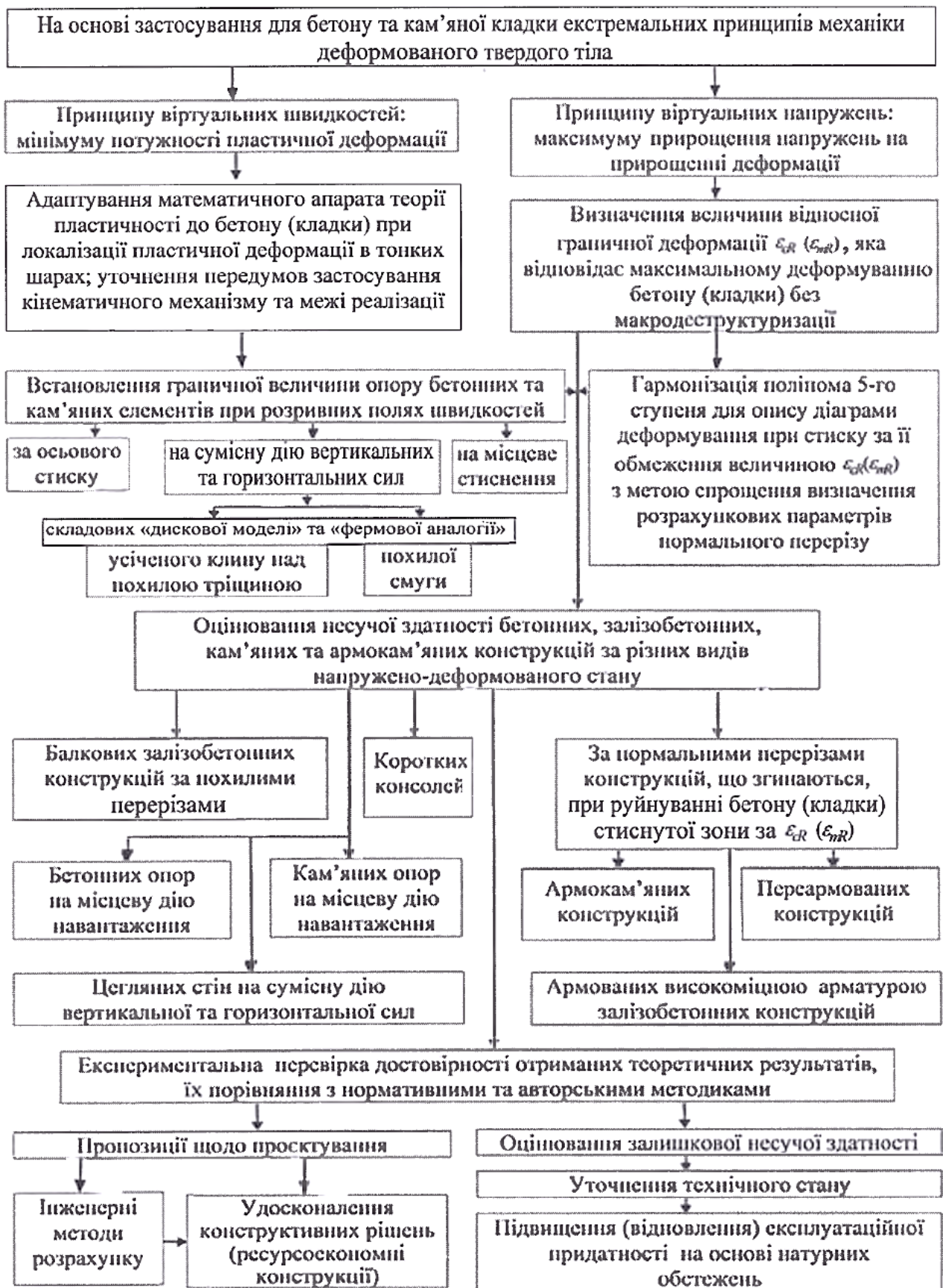


Рисунок 1 – Структурно-логічна схема дисертації

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами:** Тема дисертаційної роботи й отримані результати відповідають завданням науково-технічної політики держави у сфері енерго- та ресурсозбереження згідно з Законом України «Про енергозбереження».

Дослідження виконувалися в Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» у межах держбюджетних тем:

– «Збірно-монолітна конструктивна система під соціальне житло» (номер державної реєстрації 0113U000383);

– «Комплексні конструктивні рішення забезпечення енергоефективності громадських будівель в умовах євроінтеграції» (номер державної реєстрації 0118U001097);

– «Енергоефективні конструктивні рішення елементів будівель» (номер державної реєстрації 0121U109497);

– «Ресурсоекономні конструкції та планувальні рішення сталезалізобетонних систем для споруд цивільного захисту в нових та реконструйованих будівлях» (номер державної реєстрації 0123U102068),

а також відповідають пріоритетному напрямку науково-дослідних робіт кафедри будівельних конструкцій на тему: «Дослідження і розроблення інженерних методів розрахунку опору руйнуванню й деформуванню бетонних і залізобетонних, кам'яних та армокам'яних елементів, що зазнають неоднорідний напружено-деформований стан при різному характері впливів і середовища» (номер державної реєстрації 0117 U 003248).

**Метою роботи** є вирішення важливої науково-технічної проблеми оцінювання несучої здатності залізобетонних та кам'яних конструкцій на загальній теоретичній основі з використанням умов екстремуму деформування для врахування особливостей напружено-деформованого стану при розривних рішеннях, уникнення перевищення відносно деформацією бетону і кам'яної кладки стиснутої зони граничної величини в нормальному перерізі при згині, підвищення ефективності проектування, удосконалення конструктивних рішень, відновлення експлуатаційної придатності конструкцій.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні **задачі дослідження**:

– підтвердити можливість застосування математичного апарату теорії пластичності, варіаційного числення, екстремальних принципів для оцінювання несучої здатності залізобетонних і кам'яних конструкцій та їх елементів;

– адаптувати класичний математичний апарат теорії пластичності при застосуванні концепції жорстко-пластичного тіла та розривних рішеннях для визначення опору бетонних елементів і кам'яної кладки в умовах плоского напруженого стану та плоскої деформації із врахуванням особливостей їх міцносних і деформативних властивостей;

– перевірити математичний апарат теорії пластичності за дійсних площин ковзання на прийнятій умові міцності;

– встановити значення міцності цегли і каменів правильної форми та міцності розчину, за яких кам'яна кладка може вважатися монолітною;

- уточнити область реалізації зсуву в бетоні;
- визначити опір бетонних і кам'яних елементів з використанням умови мінімуму пластичного деформування за різних видів напружено-деформованого стану: при осьовому стиску, сумісній дії вертикальної та горизонтальної сил і місцевому стисненні; врахувати вплив армування;
- встановити величину граничної відносної деформації на діаграмі «напруження - деформація» бетону (кам'яної кладки) при стиску, яка відповідає максимальному деформуванню без «макродеструктуризації», у випадку втрати несучої здатності залізобетонних та армокам'яних конструкцій шляхом руйнування стиснутого бетону (кам'яної кладки) за нормальним перерізом;
- окреслити умови реалізації руйнування за нормальними перерізами конструкцій, що згинаються, при досягненні напруженнями в поздовжній арматурі міцності на розтяг або втрати несучої здатності за бетоном (кам'яною кладкою) стиснутої зони;
- визначити несучу здатність з використанням умов мінімуму потужності пластичної деформації та врахуванням особливостей напружено-деформованого стану: балкових залізобетонних конструкцій за похилими перерізами на дію поперечної сили; коротких залізобетонних консолей; опорних ділянок при місцевому стисненні; кам'яних стін на сумісну дію горизонтального (сейсмічного) та вертикального навантаження; розробити інженерні методи оцінювання несучої здатності залізобетонних і кам'яних конструкцій;
- виконати експериментальну перевірку отриманих теоретичних результатів для підтвердження їх достовірності та порівняти запропоновані методи з нормативними;
- удосконалити конструктивні рішення із застосуванням запропонованої методології оцінювання несучої здатності; встановити залишкову несучу здатність переармованих поздовжньою арматурою конструкцій унаслідок пошкодження або зниження міцності бетону та кам'яної кладки.

**Об'єкт дослідження:** деформування залізобетонних і кам'яних конструкцій.

**Предмет дослідження:** несуча здатність залізобетонних і кам'яних конструкцій.

**Методи дослідження:** аналітичний огляд літературних джерел; варіаційне числення з використанням концепції жорстко-пластичного тіла, екстремальних принципів механіки деформівного твердого тіла, розривних полів швидкостей при зсуві, встановленні граничних значень параметрів нелінійного деформування бетону та кам'яної кладки; експериментальні дослідження; оброблення й аналіз даних порівняння результатів експериментальних і теоретичних досліджень.

**Наукова новизна** отриманих результатів полягає в тому, що на основі використання умов екстремуму деформування бетону та кам'яної кладки **вперше:**

- для розв'язання задач опору бетонних, залізобетонних, кам'яних і армокам'яних елементів в умовах плоского напруженого стану та плоскої деформації в якості параметра варіювання при застосуванні принципу

віртуальних швидкостей на кінематичній схемі прийнято кут  $\psi$  між напрямком руху жорстких дисків і поверхнею локалізації пластичної деформації, який є кутом дотичної до умови міцності бетону та кам'яної кладки й однозначно визначає на ній величину напружень;

- отримана межа реалізації зрізу в бетоні в області змішаних напружених станів шляхом звуження інтервалу дійсних площин ковзання за величиною міри пластичності  $\mu_{pl}$ , що розглядається як відношення висоти стиснутої зони в граничній та пружній стадіях роботи коротких бетонних елементів при мінімальному впливі згинального моменту, до точки напружень

$$\sigma_2 = \mu_{pl} \left( f_{ct} + \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{f_c^2 - f_c f_{ct} + f_{ct}^2 - f_c} \right), \text{ якій відповідають } \tau_n = \frac{2}{\sqrt{3}} \tau_{\max};$$

- з використанням розривних рішень розв'язані задачі опору бетонних і кам'яних елементів в умовах плоскої деформації при одновісному стиску та сумісній дії вертикального і горизонтального навантаження, а також вдавлення прямокутного штапу в бетонну основу з встановленням межі між випадками одночасного досягнення граничного стану бетонної основи в зонах стиску і розтягу та її руйнування лише в стиснутій зоні;
- визначено несучу здатність залізобетонних консолей з використанням умови мінімуму потужності пластичної деформації за величиною опору похилої армованої смуги з врахуванням дотичного та нормального зусиль і впливу поздовжнього армування як додаткової в'язі;
- з використанням принципу віртуальних швидкостей встановлено несучу здатність кам'яної стіни на сумісну дію горизонтального та вертикального навантаження при зсуві за перерізом, що проходить за каменем;
- за максимального деформування без «макродеструктуризації», котра приводить до втрати несучої здатності, визначено рівень граничної відносної деформації бетону та кам'яної кладки на низхідній гілці їх діаграм «напруження - деформація» при стиску, який відповідає максимальній величині прирощень середніх напружень на деформації;
- за встановленого рівня граничної відносної деформації бетону (кам'яної кладки) визначено:
  - несучу здатність за нормальними перерізами армованих високоміцною арматурою залізобетонних елементів, що згинаються, з використанням верхньої висхідної гілки деформування арматури;
  - залишкову несучу здатність у нормальних перерізах балкових залізобетонних і армокам'яних конструкцій, переармованих поздовжньою арматурою;

#### **набули подальшого розвитку:**

- математичний апарат теорії пластичності при розривних рішеннях задач опору бетонних елементів та кам'яної кладки з врахуванням особливостей їх міцносних та деформативних властивостей в умовах плоского напруженого стану та плоскої деформації із застосуванням в якості характеристики міцності максимальної величини дотичних напружень;

- обґрунтування умов реалізації пластичного кінематичного механізму в бетоні та кам'яній кладці при локалізації пластичної деформації в тонких шарах на поверхні руйнування;
- визначення характеристик міцності цегли та каменів правильної форми і розчину, за яких кладка може вважатися монолітною та розрахунковий переріз проходить за цеглою або каменем;
- рішення задач опору бетонних та кам'яних елементів в умовах плоского напруженого стану з використанням принципу віртуальних швидкостей при:
  - осьовому стиску призм за різних випадків руйнування, стовпів та симетричних клинів;
  - односторонньому та двосторонньому місцевому стиску за одночасного досягнення граничного стану основи в зонах стиску та розтягу і вдавлюванні штампів в масивну основу з встановленням межі їх реалізації;
  - сумісній дії вертикального та горизонтального навантаження на бетонну пластинку за різних кутів її нахилу з врахуванням впливу армування та усічених клиноподібних елементів;
- розрахунок несучої здатності конструкцій:
  - залізобетонних на дію поперечної сили за похилими перерізами, визначеної у межах похилої стиснутої смуги та клиноподібної стиснутої зони над небезпечною похилою тріщиною з врахуванням впливу поперечної арматури, котра перетинає смугу, та роботи бетону над тріщиною;
  - на опорних ділянках при місцевій дії навантаження з врахуванням об'ємного напруженого стану для бетону та відношення їх висоти до ширини площадки навантаження для кам'яної кладки;
  - армокам'яних, що згинаються, у нормальних перерізах при досягненні напруженнями в поздовжній арматурі міцності на розтяг і максимальному рівні деформації за умови підвищення навантаження.

**Достовірність отриманих наукових результатів** забезпечується задовільною збіжністю запропонованих розрахункових схем з картиною руйнування та визначених теоретично й експериментально величин несучої здатності (опору) бетонних, залізобетонних, кам'яних і армокам'яних конструкцій (елементів) за різних видах напружено-деформованого стану (балок на дію згинального моменту та поперечної сили, коротких консолей, зразків-моделей при місцевому стисненні, діагональному розколюванні, руйнуванні за цілим перерізом), засвідченою на 186-ти дослідних зразках.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в тому, що:

- розроблені інженерні методи розрахунку несучої здатності:
  - залізобетонних конструкцій, що згинаються, армованих високоміцною арматурою за нормальними перерізами;
  - балкових залізобетонних конструкцій за похилими перерізами на дію поперечної сили;
  - коротких залізобетонних консолей;
  - бетонних та кам'яних опорних ділянок на місцеву дію навантаження;
  - цегляних стін на сумісну дію горизонтальної та вертикальної сил;



- армокам'яних конструкцій, що згинаються, за нормальними перерізами;
- удосконалені конструктивні рішення:
  - армованих високоміцною арматурою залізобетонних конструкцій, що згинаються (зменшена кількість поздовжньої арматури);
  - залізобетонних ригелів збірно-монолітних міжповерхових перекриттів (знижена інтенсивність поперечного армування);
  - стикових з'єднань залізобетонних колон багатоповерхових будівель з підвищенням опору місцевому стиску,
- що відкриває перспективи ресурсозбереження при проектуванні конструкцій;
- надані пропозиції щодо оцінювання залишкової несучої здатності на дію згинального моменту, переармованих поздовжньою арматурою внаслідок пошкодження стиснутої зони бетону (кам'яної кладки) або зниження їх міцності в результаті експлуатації залізобетонних і армокам'яних конструкцій, з метою уточнення їх технічного стану й ефективного відновлення експлуатаційної придатності.

Результати виконаних досліджень будуть враховані при розробці положень ДСТУ «Проектування конструкцій будівель і споруд з урахуванням сейсмічного впливу» в розвиток ДБН В.1.1-12-2014 «Будівництво у сейсмічних районах України» та використані у науково-практичній діяльності ДП НДІБК; знайшли застосування у звітній документації за держбюджетними темами, пов'язаними з енергоефективними конструктивними рішеннями елементів житлових і громадських будівель та споруд цивільного захисту; в розрахунках несучих залізобетонних і кам'яних конструкцій при проектуванні та відновленні експлуатаційної придатності фундаментів, кам'яних стін, балок перекриття, консолей залізобетонних колон, підкранових балок і опорних ділянок при обстеженні та паспортизації об'єктів. Матеріали дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» у лекційних курсах «Будівельні конструкції», «Технічна експлуатація будівель і споруд» та «Ремонт і підсилення будівельних конструкцій», використані при виконанні магістерських робіт.

**Особистий внесок здобувача.** Викладені в дисертаційній роботі ідеї, основні положення, теоретичні розробки та практичні результати отримані автором особисто. В проведених та опублікованих у співавторстві дослідженнях особистий внесок здобувача полягає у визначенні дійсного деформованого стану елементів і конструкцій, науковому обґрунтуванні можливості реалізації пластичного кінематичного механізму та застосуванні умов екстремуму деформування для створення методології оцінювання несучої здатності конструкцій і деталізовано в списку публікацій здобувача за темою дисертації.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертаційної роботи оприлюднені: на 2nd fib Congress (June 5 – 8, 2006, Naples); 13th fib International PhD Symposium in Civil Engineering (August 26 – 28, 2020, Paris); Міжнародній науково-практичній конференції «MODERN SCIENTIFIC RESEARCHES AND DEVELOPMENTS: THEORETICAL VALUE AND PRACTICAL RESULTS» (15 – 18 березня 2016 р., Братислава); Міжнародній конференції «Питання. Відповіді. Гіпотези; наука XXI століття» (30 – 31 травня 2014 р., Гданськ);

6-й і 7-й Міжнародних науково-практичних конференціях «Надійність та довговічність інженерних споруд та будівель залізничного транспорту» (19 – 21 квітня 2017 р.) і (14 – 16 листопада 2018 р.); та 8-й і 9-й Міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (20 – 22 листопада 2019 р., 17 – 19 листопада 2021 р.), Харків; II – IV Міжнародних конференціях «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд» (16 – 17 листопада 2017 р., 26 – 28 вересня 2019 р., 09 – 11 вересня 2021 р., Одеса); I Міжнародній науково-практичній конференції «TECHNOLOGY, ENGINEERING AND SCIENCE – 2018» (24 – 25 жовтня 2018 р., Лондон); I і III Міжнародних азербайджансько-українських конференціях «BUILDING INNOVATIONS-2018» (24 – 25 травня 2018 р.), «BUILDING INNOVATIONS – 2020» (1 – 2 червня 2020 р.), Баку – Полтава; II і IV українсько-азербайджанських конференціях «BUILDING INNOVATIONS – 2019» (23 – 24 травня 2019 р.) і «BUILDING INNOVATIONS – 2021» (20 – 21 травня 2021 р.), Полтава – Баку; XII – XIV Міжнародних науково-практичних конференціях «Академічна й університетська наука: результати та перспективи» (06 грудня 2019р.), (10 – 11 грудня 2020 р.) і (09 грудня 2021 р.), Полтава; Міжнародній науково-технічній конференції «Енергоефективність на транспорті» (18 – 20 листопада 2020 р., Харків); II і V Міжнародних науково-технічних конференціях «Ефективні технології в будівництві» (06 – 07 квітня 2017 р.) і (19 листопада 2020 р., Київ); XIX Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні технології у будівництві, цивільній інженерії та архітектурі» (19 – 22 вересня 2021 р., Чернігів); Десятій Міжнародній науково-технічній конференції «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди» (19 – 21 жовтня 2021 р., Рівне); XIV Міжнародній науково-технічній конференції «Комплексні композитні конструкції будівель та споруд в умовах воєнного стану (CSCS –2022)» (20 – 22 червня 2022 р., Полтава); Міжнародній науково-технічній on-line конференції «Проблеми будівельного та транспортного комплексів» (23 – 24 травня 2023 р., Кропивницький).

У повному обсязі дисертаційна робота доповідалася на наукових семінарах ОДАБА (27.03.2024 р., Одеса), ПДАБА УДУНТ (05.05.2024 р., Дніпро), ХНУМГ ім. О.М. Бекетова (26.06.2024 р., Харків), розширеному засіданні кафедри будівництва НУБіП України (25.06.2024 р., Київ) та семінарі при спеціалізованій вченій раді Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (29.08.2024 р.).

**Публікації.** Результати дисертації опубліковані в 75 наукових працях: 5 монографій, серед яких одна одноосібна; 16 статей у виданнях іноземних держав, серед яких 15 у виданнях, проіндексованих у базі даних Scopus, у тому числі 3 у базі даних Web of Science Core Collection; 29 статей у фахових виданнях України; 22 матеріали та тези конференцій; отримано 3 патенти.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і семи додатків. Робота викладена на 480 сторінках машинописного тексту, у тому числі містить 309 сторінок основного тексту, 58 сторінок списку використаних джерел із 494 найменувань, 75 сторінок додатків і має 72 таблиці та 143 рисунки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність проблеми, яка вирішується, наведено зв'язок роботи із науковими програмами, темами, сформульовано мету і задачі дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, приведені дані про публікації, апробацію та впровадження матеріалів дисертації, представлено її структура й обсяг.

У **першому розділі** розглянуті основні етапи розвитку та вдосконалення теорії пластичності, варіаційного числення, екстремальних принципів. Приділена увага методу характеристичних ліній, дискретним та розривним рішенням задач опору та несучої здатності. Початкові положення варіаційних принципів та екстремальних теорем викладені Л. да Вінчі та Галілеєм Г.; у подальшому значний вклад у їх розроблення та класичне представлення теорії пластичності внесли Баженов В.А., Бернуллі Д., Боголюбов О.М., Бубнов І.Г., Васидзу К., Гаусс К., Генки Г., Геращенко В.О., Гончаренко М.В., Губер М.Т., Ейлер Л., Івлєв Д.Д., Ішлінський О.Ю., Карман Т., Кастільяно А., Качанов Л.М., Кірхоф Г., Колмогоров В.Л., Лагранж Ж., Лебедев А.О., Лейбніц Г., Малінін М.М., Мізес Р., Надаї А., Остроградський М.В., Писаренко Г.С., Попов Є.А., Прагер В., Прандтль Л., Пуассон С., Рітц В., Ржаніцин О.Р., Роботнов Ю.М., Сен-Венан А., Сєдов Л.І., Смірнов В.С., Соколовський В.В., Тимошенко С.П., Треска А.Е., Хрiстiанович С.А., Chakrabarty J., Chen W.-F., Han D.J., Prager W., Hill R., Hodge P.G., Lubliner J., Mineola L.J., Newton I., Truesdell C.A., Zhang H. та інші.

Висвітлено широкі можливості математичного апарату теорії пластичності для отримання достатньо простих розривних рішень при визначенні опору пластичних тіл, як альтернативу складним дискретним рішенням та методу скінченних елементів. Однак, для квазікрихких матеріалів його використання обмежено невеликою кількістю досліджень і розв'язаних задач.

Застосуванню теорії пластичності до бетону та кам'яної кладки, встановленню критеріїв та вибору умови міцності, яка може розглядатися як умова пластичності, присвячені дослідження Алікової Н.М., Безушка Д.І., Белоброва І.К., Гвоздева О.О., Генієва Г.О., Гузєєва Є.А., Довженко О.О., Карпенка М.І., Кісюка В.М., Клованича С.Ф., Клименка Є.В., Корсуна В.І., Лебедева А.О., Лейтеса Є.С., Мора О.Х., Маркова А.А., Митрофанова В.П., Петрова К.В., Писаренка Г.С., Ржаніцина О.Р., Тюпіна Г.О., Яшина О.В., Ansari F., Bento R., Braestrup M., Campbell T.I., Cavagnis F., Christiansen M.B., Collins M., Costa J.L., Ding D.J., Geel Van E., Hagsten L.G., Hampel T., Hibino Y., Hoang L.C., Hsu T., Ichinose T., Jensen U.G., Johansen K., Levtchitch Y., Liu J.Y., Marti P., Marubashi N., Mueller P., Muttoni A., Nielsen M.P., Rosenthal I., Shui W., Slate F.O., Teoh B.K., Vecchio F., Warnke E.P. та інших.

Проаналізовано існуючі методи визначення опору і несучої здатності бетонних і кам'яних елементів при одновісному та двовісному нерівномірному стиску в умовах плоского напруженого стану та плоскої деформації за дійсних площин ковзання, місцевому стиску, а також ділянок біля опор залізобетонних балкових конструкцій, коротких консолей, цегляних стін на дію вертикальних та горизонтальних (сейсмічних) сил. У цьому напрямку слід відмітити наукові праці

Бабича Є.М., Бабича В.Є., Бабіка К.М., Бамбури А.М., Баранової Т.І., Барашикова А.Я., Безушка Д.І., Бондаренка А.В., Боришанського М.С., Буслера Л.Е., Ватулі Г.Л., Вахненко П.Ф., Виршиласа В.Ю., Гвоздєва О.О., Генієва Г.О., Довженко О.О., Дорофєєва В.С., Дорошкевича Л.О., Залєсова О.С., Карпюка В.М., Кічаєвої О.В., Клименка Є.В., Клімова Ю.А., Колчунова В.І., Ковалє П.М., Корнійчука О.І., Кочкарьова Д.В., Максимовича Б.Ю., Мамєдова А.М., Мар'єнкова М.Г., Митрофанова В.П., Молоша В.В., Морозова О.М., Немчинова Ю.І., Нікіфорової Т.Д., Онищика Л.І., Попова Г.І., Родевича В.В., Ротка С.В., Савицького М.В., Ситника В.І., Соколова Б.С., Старишка І.М., Стороженка Л.І., Торяника М.С., Тура В.В., Філіпчука С.В., Чинєнкова Ю.В., Шагіна О.Л., Шєховцова І.В., Яковєнка І.А., Anderson D., Ayub T., Brzev S., Drysdale R.G., Dumova-Jovanoska E., Ganesan T.P., Johnson M.K., Nyland W.M., Keras V., Khalifa E.S., Kriz L.B., Layla A., Lee J.-H., Leonhardt F., Lumantarna R., Mann W., Muller H., Paulay T., Siao W.B., Shin S.W., Venckevicius V., Zhao J. та інших.

Аналіз існуючих методів розрахунку несучої здатності бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкцій засвідчує необхідність теоретичного рішення задач опору їх елементів з врахуванням особливостей напружено-деформованого стану на стадії руйнування та використання в якості достатньо загальної основи теорії пластичності. Встановлені перспективи її застосування при локалізації інтенсивної деформації на поверхні зсуву, що характерно для бетону та кам'яної кладки, і розривних рішень для спрощення розрахунків.

Останнім часом у розрахунках залізобетонних конструкцій широкого розповсюдження набула нелінійна деформаційна модель. При цьому, одне із ключових питань – встановлення граничної відносної деформації, котра обмежує діаграму деформування бетону при стиску. Вказаному напрямку присвячені дослідження Азізова Т.Н., Бабича В.Є., Бабича В.І., Бабича Є.М., Байкова В.М., Бамбури А.М., Барашикова А.Я., Бачинського В.Я., Берга О.Я., Бича П.М., Бліхарського З.Я., Бондаренка В.М., Вахненко П.Ф., Гвоздєва О.О., Горбатова С.В., Гуці Ю.П., Дорофєєва В.С., Дохойди М., Журавльової Н.В., Журавського О.Д., Залєсова О.С., Ільїна О.Ф., Кваши В.Г., Крамарчука А.П., Красинського М.П., Круся Ю.А., Маїляна Д.Р., Карпенка М.І., Лучка Й.Й., Митрофанова В.П., Муракіна Г.В., Мурашка Л.А., Назарєнка В.Г., Несветєєва Г.В., Павлікова А.М., Рогового С.І., Ромашка В.М., Ротка С.В., Рубана Г.К., Савицького М.В., Холмянського М.М., Чистякова Є.О., Шагіна О.Л., Шкурупія О.А., Шмуклера В.С., Яшина О.В., Attard M., Ayub T., Calabrese A., Camacho J.S., Everard M., Fayala I., Glanville J., Haach V.G., Jensen V.P., Kani G.N.S., Kent D.C., Khalaf J., Konig G., Kyriakides M.A., Mazzarello O., Omikrine Metalssi O., Saliger R., Suter G.T. та інших. У нормах різних країн, які узагальнюють матеріали авторських досліджень, величина граничної відносної деформації  $\epsilon_{cu}$  приймається як постійною на всьому інтервалі класів міцності бетону на стиск: за нормами США і Британії відповідно 3 % і 3,5 %; так і змінною: за нормами України  $\epsilon_{cu1}$  при класі бетону С8/10 складає 3,75 %, при С50/60 – 2,29 %; за нормами Франції від 3,5 % до 2 %, за Єврокодом 2 знижуються лише при  $f_{ck} > 50$  МПа від 3,5 % до 2,8 % за  $f_{ck} = 90$  МПа.

Експериментально засвідчено, що втрата несучої здатності за нормальними перерізами залізобетонних конструкцій, що згинаються, відбувається як за досягнення напруженнями в поздовжній арматурі міцності на розтяг, так і шляхом руйнування бетону стиснутої зони при перевищенні відносною деформацією стиску граничної величини. У першому випадку несуча здатність визначається з використанням екстремального силового критерія – умови максимуму згинального моменту. Вказане стосується й армокам'яних конструкцій. Для армованих високоміцною поздовжньою арматурою залізобетонних балок має місце руйнування стиснутої зони, що обумовлює застосування в якості розрахункового параметра граничного рівня деформації на межі деформування без «макродеструктуризації». Це також характерно і для конструкцій, переармованих поздовжньою арматурою внаслідок пошкодження стиснутої зони та зниження міцності бетону або кам'яної кладки.

За результатами проведеного аналізу підтверджена актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі досліджень, встановлена доцільність подальшої систематизації на теоретичній основі та додаткового врахування факторів, щопливають на несучу здатність конструкцій.

У другому розділі розв'язані питання адаптування класичного математичного апарату теорії пластичності, розробленого для пластичних тіл, до бетону та кам'яної кладки з врахуванням особливостей їх міцностних і деформативних характеристик та поведінки в граничному стані. В якості умови пластичності прийнята умова міцності, яка геометрично представляє собою в координатах головних нормальних напружень параболоїд обертання, враховує різницю міцності бетону (кам'яної кладки) на розтяг і стиск та має простий запис у тензорній формі, що суттєво спрощує розрахункові залежності.

Область реалізації зсуву при плоскому напруженому стані уточнена шляхом введення показника міри пластичності  $\mu_{pl}$  як відношення висоти стиснутої зони при руйнуванні до її висоти в пружній стадії роботи, котрий отримано на коротких бетонних елементах за мінімального впливу згинального моменту. Нижня межа знаходиться в області змішаних напружених станів, наближена до точки осьового стиску та визначається добутком  $\mu_{pl}\sigma_{2,max}$ , де  $\sigma_{2,max}$  – точка максимального напруження розтягу на умові міцності, а верхня границя – в області нерівномірного стиску. Величина дотичних напружень на площадці руйнування:  $\tau_n \geq \sqrt{2/3}\tau_{max}$ . Бетон і кам'яна кладка розглядаються як жорстко-пластичне тіло. Пластична направлена деформація при зсуві локалізується в тонких шарах на поверхні руйнування, сусідні області вважаються абсолютно жорсткими. Застосовуються розривні рішення та принцип віртуальних швидкостей. Стрибки швидкостей мають місце як у дотичному  $\Delta v_t$ , так і нормальному  $\Delta v_n$  до поверхні руйнування напрямках, що враховує збільшення об'єму бетону в граничному стані.

Функціонал принципу віртуальних швидкостей при товщині шару пластичності, що добігає до нуля ( $\Delta n \rightarrow 0$ ), має вигляд:

$$J = \int_{S_I} (TH + \sigma\xi)\Delta n dS - \int_{S_F} f_i v_i dS, \quad (1)$$

де  $T$  і  $H$  – інтенсивності дотичних напружень і швидкостей деформації зсуву;  $\bar{\sigma}$  – середнє напруження;  $\xi$  – об’ємна деформація;  $S_l$  і  $S_F$  – площі поверхні руйнування та дії поверхневої сили  $f_i$ ;  $v_i$  – швидкість у напрямку сили  $f_i$ .

Враховуючи особливості напружено-деформованого стану при плоскій деформації та рівняння  $\lim_{\Delta n \rightarrow 0} T(H \Delta n) = \int_{S_l} (T \sqrt{4\Delta v_n^2 / 3 + \Delta v_t^2} + \sigma \Delta v_n)$  і  $\lim_{\Delta n \rightarrow 0} (\sigma \xi \Delta n) = \sigma \Delta v_n$  функціонал набуває вигляд:

$$J = \int_{S_l} (T \sqrt{4\Delta v_n^2 / 3 + \Delta v_t^2} + \sigma \Delta v_n) - \int_{S_F} f_i v_i dS. \quad (2)$$

Використовуючи систему рівнянь, що зв’язують параметри напружено-деформованого стану, котра включає асоційований закон течії, залежність між  $T$  і  $H$  та умову міцності бетону  $T^2 - m\sigma - T_{sh}^2 = 0$ , тут  $T_{sh} = \sqrt{f_c f_{ct} / 3}$  – напруження при «чистому зрізі», і вводячи характеристики міцності бетону  $d^2 = (f_c^2 - f_c f_{ct} + f_{ct}^2) / 3$  і  $m = f_c - f_{ct}$ , де  $f_c$  і  $f_{ct}$  – міцність бетону при осьовому стиску та розтягу, функціонал записується у вигляді:

$$J = \int_{S_l} \left[ \frac{d^2}{m} + \frac{m}{4} \left( \frac{\Delta v_t}{\Delta v_n} \right)^2 \right] \Delta v_n dS - \int_{S_F} f_i \Delta v_i dS. \quad (3)$$

Функціонал  $J$  досліджується на стаціонарний стан за допомогою варіаційного рівняння  $\delta J = 0$ , яке має вид:

$$\delta \left\{ \int_{S_l} \left[ \frac{d^2}{m} + \frac{m}{4} \left( \frac{\Delta v'_t}{\Delta v'_n} \right)^2 \right] \Delta v'_n dS - \int_{S_F} f_i \Delta v'_i dS \right\} = 0. \quad (4)$$

Дійсному напружено-деформованому стану із усіх можливих кінематичних станів і граничному значенню опору елементів відповідає той, при якому потужність пластичної деформації мінімальна. Для зручності запису в якості параметрів, що варіюються, запропоновано використовувати кут  $\psi$  між напрямком швидкості жорсткого диску  $v$  та поверхнею розриву швидкостей і кут  $\gamma$  між поверхнею руйнування та напрямком дії сили. За осьового та двовісного стиску значення кута  $\gamma$  встановлюється із рівняння  $\gamma = \pi / 4 - \psi / 2$  і кут  $\psi$  однозначно визначає напружений стан (точку на умові міцності). При записі стрибків швидкостей через кут  $\psi$  і швидкість  $v$ :  $\Delta v_t = v \cos \psi$ ,  $\Delta v_n = v \sin \psi$ , площі поверхні руйнування  $S_l = S_F \sin \gamma = S_F / \sin(\pi / 4 - \psi / 2)$  головні напруження  $\sigma_1$  при заданих напруженнях  $\sigma_2$  визначаються із рівняння:

$$\sigma_1 = \left\{ 2 \left[ \frac{d^2}{m} + \frac{m}{4} \left( \frac{\cos \psi'}{\sin \psi'} \right)^2 \right] \sin \psi' \pm \sigma_2 (1 + \sin \psi') \right\} / (1 - \sin \psi'), \quad (5)$$

де знак «+» перед  $\sigma_2$  при напруженнях стиску, «-» – за напружень розтягу.

В умовах плоского напруженого стану функціонал принципу має вигляд:

$$J = \int_{S_l} \left[ d \sqrt{4\Delta v_n'^2 + \Delta v_t'^2} - m \Delta v_n' \right] dS - \int_{S_F} f_i v'_i dS. \quad (6)$$

Проведена перевірка адаптованого математичного апарату теорії пластичності при розв'язанні задачі міцності бетонної пластинки за напружених станів у інтервалі дійних площин ковзання.

Величина нормальних напружень  $\sigma_1$  при заданому значенні напруження  $\sigma_2$  та варіюванні кута  $\psi$  дотичної до умови міцності складає:

$$\sigma_1 = \frac{2 \left( d \sqrt{1 + 3 \sin^2 \psi'} - m \sin \psi' \right) \pm (1 + \sin \psi') \sigma_2}{1 - \sin \psi'} \quad (7)$$

Дотичні та нормальні напруження визначаються із рівнянь:

$$\tau_n = \frac{d}{\sqrt{1 + 4 \tan^2 \psi}} \quad (8)$$

$$\sigma_n = m - 4d \frac{\tan \psi}{\sqrt{1 + 4 \tan^2 \psi}} \quad (9)$$

Кінематична схема руйнування бетонної пластинки представлена на рис. 2, а, умова міцності при плоскому напруженому стані в координатах  $\tau_n - \sigma_n$  – на рис. 2, б. Отримані результати надані в табл. 1.

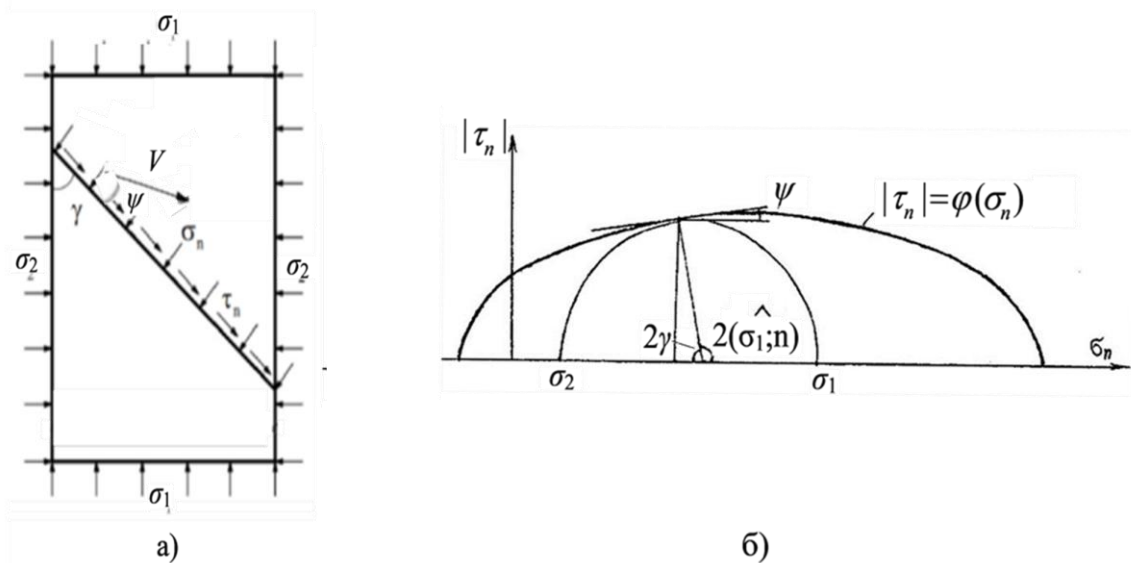


Рисунок 2 – Кінематична схема руйнування бетонної пластинки (а); гранична обвідна кіл Мора  $|\tau_n| = \varphi(\sigma_n)$  (б);  $V$  – швидкість руху дисків

Таблиця 1 – Значення кута  $\psi$  та параметрів напружень при плоскому напруженому стані

Характерні точки	$f_{ct}/f_c$	$\sigma_2/f_c$	$\psi$	$\tau_n/f_c$	$\sigma_n/f_c$	$\sigma_1/f_c$
Межа в області змішаних станів	0,1	-0,054	19°28'	0,450	0,264	0,9
Одновісний стиск		0	15°28'	0,482	0,367	1
Максимум дотичних напружень		0,349	0	0,551	0,9	1,451
Межа в області двовісного стиску		0,9	-19°28'	0,450	1,536	1,854

Отримані в результаті розрахунку величини напружень дорівнюють їх значенням на прийнятій умові міцності при плоскому напруженому стані та плоскій деформації на всьому інтервалі, що розглядається.

Вплив армування враховується шляхом введення в функціонал принципу віртуальних швидкостей складової, що включає напруження обтиснення, котре діє у напрямку розміщення арматури та відповідає інтенсивності армування.

Адаптований до бетону та залізобетону математичний апарат теорії пластичності може бути використано для розв'язання широкого кола задач опору елементів у разі реалізації на стадії руйнування пластичного кінематичного механізму, що характеризується локалізацією направленої інтенсивної деформації за цілим перерізом та одночасністю існування граничного стану за всією областю руйнування при наявності зон стиску і розтягу.

Враховуючи наближені до бетону відношення характеристик міцності при розтязі та стиску й деформативні властивості кам'яної кладки запропонований математичний апарат можливо застосовувати і для кам'яних елементів.

У **третьому** розділі проведено оцінювання опору бетонних і кам'яних елементів варіаційним методом в умовах плоского напруженого стану та плоскої деформації.

Розв'язані задачі опору:

А) бетонних і кам'яних елементів осьовому стиску (рис. 3).

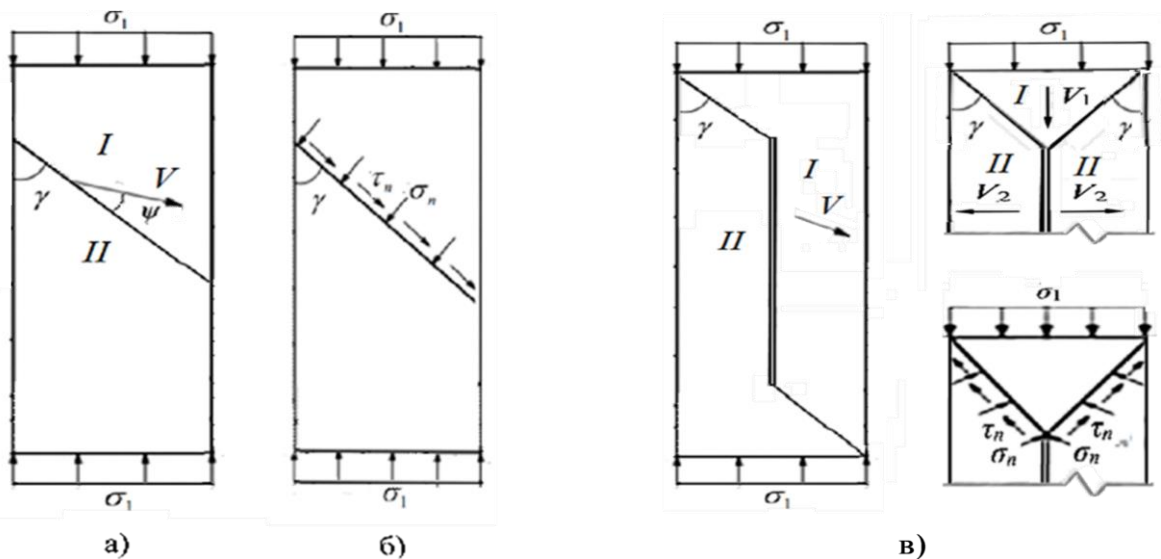


Рисунок 3 – До визначення опору бетонних і кам'яних елементів осьовому стиску: кінематична схема при зсуві в одній площині (а); розподіл напружень у розрахунковому перерізі (б); кінематична схема при зсуві в двох площинах (в);

$V_1$  і  $V_2$  – швидкості руху дисків I і II в напрямку головних напружень

Залежності для визначення опору:

– при плоскому напруженому стані:

$$\frac{N_{sh}}{A_c} = \sigma_1 = \frac{2 \left( d \sqrt{1 + 3 \sin^2 \psi'} - m \sin \psi' \right)}{1 - \sin \psi'}, \quad (10)$$

де  $A_c$  – площа поперечного перерізу елемента;



– при плоскій деформації:

$$\frac{N_{sh}}{A_c} = \sigma_1 = \frac{2 \left[ \frac{d^2}{m} + \frac{m}{4} \left( \frac{1}{\sin^2 \psi'} - 1 \right) \right] \sin \psi'}{1 - \sin \psi'}. \quad (11)$$

При наявності вертикальної тріщини в середній за висотою частині елемента, яка розповсюджується на стадіях, що передують граничній, руйнування відбувається в стиснутих зонах. За всіх наведених кінематичних схемах величина опору однакова.

Б) симетричного бетонного клину осьовому стиску (рис. 4, а):

– при плоскому напруженому стані:

$$\frac{N_{sh}}{A_s} = \sigma_1 = \frac{\tan(\gamma' + \psi') - \tan \gamma'}{\tan \gamma' - \tan \alpha} \left( \frac{d \sqrt{1 + 4 \tan^2 \psi'}}{\tan \psi'} - m \right); \quad (12)$$

– при плоскій деформації:

$$\frac{N_{sh}}{A_s} = \sigma_1 = \left[ \frac{\tan(\gamma' + \psi') - \tan \gamma'}{\tan \gamma' - \tan \alpha} \right] \left\{ \frac{d^2}{m} + \frac{m}{4} \left[ \frac{1 + \tan(\psi' + \gamma') \tan \gamma'}{\tan(\psi' + \gamma') - \tan \gamma'} \right]^2 \right\}. \quad (13)$$

Збільшення кута клину  $\alpha$  підвищує його опір.

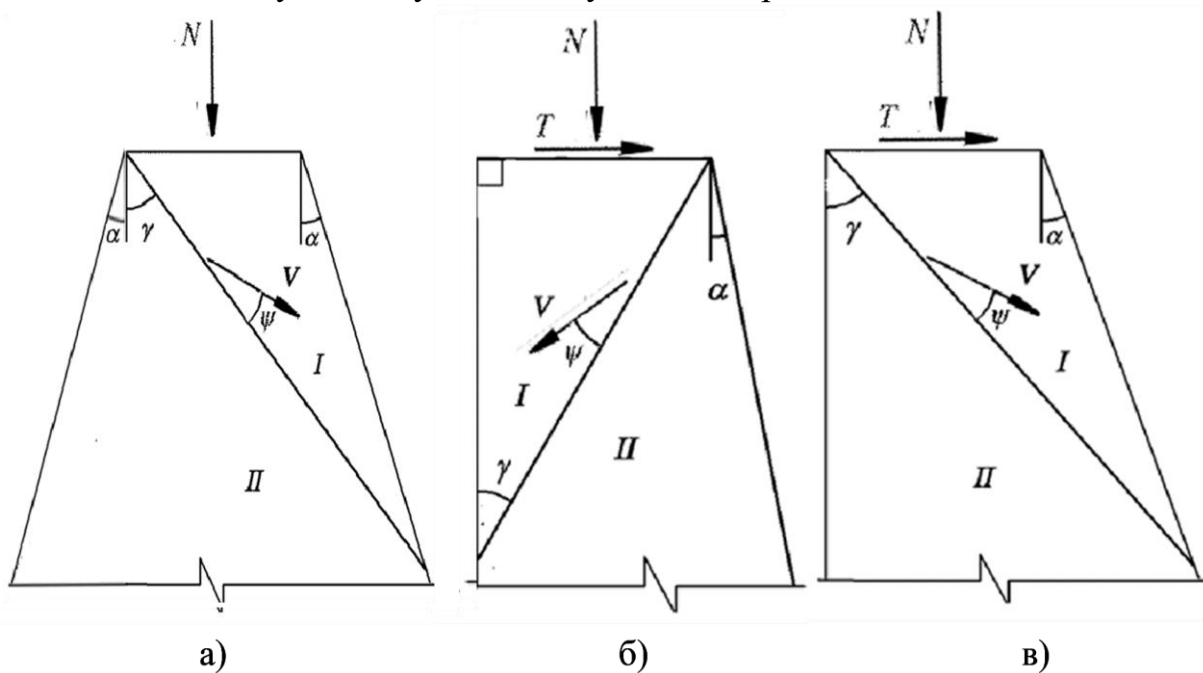


Рисунок 4 – Кінематичні схеми руйнування бетонних клинів: при центральному стиску (а); сумісній дії вертикального та горизонтального навантаження за випадку 1 (б) та випадку 2 (в)

В) бетонного усіченого клину при дії вертикального та горизонтального навантаження (рис. 4, б і в):

– при плоскому напруженому стані у випадку 1:

$$\frac{N_{sh}}{A_c} = \sigma = \left( \frac{\tan(\gamma' + \psi')}{\tan \gamma'} - 1 \right) \left( \frac{d \sqrt{1 + 4 \tan^2 \psi'}}{\tan \psi'} - m \right) \frac{1}{1 - \tan(\gamma' + \psi') \tan \beta}; \quad (14)$$

– при плоскому напруженому стані у випадку 2:

$$\frac{N_{sh}}{A_c} = \sigma = \frac{\tan(\gamma' + \psi') - \tan \gamma'}{\tan \gamma' - \tan \alpha} \left( \frac{d\sqrt{1 + 4 \tan^2 \psi'} - m}{\tan \psi'} - m \right) \frac{1}{1 + \tan(\gamma' + \psi') \tan \beta}; \quad (15)$$

– при плоскій деформації за випадку 1:

$$\frac{N_{sh}}{A_c} = \sigma = \left[ \frac{\tan(\gamma' + \psi')}{\tan \gamma'} - 1 \right] \left\{ \frac{d^2}{m} + \frac{m}{4} \left[ \frac{1 + \tan(\psi' + \gamma') \tan \gamma'}{\tan(\psi' + \gamma') - \tan \gamma'} \right]^2 \right\} \frac{1}{1 - \tan(\gamma' - \psi') \tan \beta}; \quad (16)$$

– при плоскій деформації за випадку 2:

$$\frac{N_{sh}}{A_c} = \sigma = \frac{\tan(\gamma' + \psi') - \tan \gamma'}{\tan \gamma' - \tan \alpha} \left\{ \frac{d^2}{m} + \frac{m}{4} \left[ \frac{1 + \tan(\psi' + \gamma') \tan \gamma'}{\tan(\psi' + \gamma') - \tan \gamma'} \right]^2 \right\} \frac{1}{1 + \tan(\gamma' - \psi') \tan \beta}, \quad (17)$$

де  $\tan \beta = T / N$ .

У випадку 1 величина кута клину не впливає на опір; у випадку 2 при збільшенні кута  $\alpha$  опір підвищується, а за зростання величини сили  $T$  знижується.

Г) бетонного елемента постійного поперечного перерізу, завантаженого на торцях вертикальними та горизонтальними силами:

– при плоскому напруженому стані:

$$\frac{N_{sh}}{A_c} = \sigma = \left( \frac{\tan(\gamma' + \psi')}{\tan \gamma'} - 1 \right) \left( \frac{d\sqrt{1 + 4 \tan^2 \psi'} - m}{\tan \psi'} - m \right) \frac{1}{1 + \tan(\gamma' + \psi') \tan \beta}; \quad (18)$$

– при плоскій деформації:

$$\frac{N_{sh}}{A_c} = \sigma = \left[ \frac{\tan(\gamma' + \psi')}{\tan \gamma'} - 1 \right] \left\{ \frac{d^2}{m} + \frac{m}{4} \left[ \frac{1 + \tan(\psi' + \gamma') \tan \gamma'}{\tan(\psi' + \gamma') - \tan \gamma'} \right]^2 \right\} \frac{1}{1 + \tan(\gamma' + \psi') \tan \beta}. \quad (19)$$

Встановлена межа між реалізацією випадків руйнування тільки в стиснутій зоні та одночасного досягнення граничних напружень у зоні стиску та розтягу бетонної основи при місцевому стиску.

Визначені сполучення характеристик міцності цегли та суцільних керамічних каменів правильної форми при висоті ряду кладки 50...150 мм і міцності важких розчинів, за яких кладка може вважатися монолітною та розрахунковий переріз проходить по цеглі (каменю):  $f_b=15$  МПа і  $f_m \geq 15$  МПа;  $f_b=10$  МПа і  $f_m \geq 7,5$  МПа;  $f_b=7,5$  МПа і  $f_m \geq 5$  МПа;  $f_b=5$  МПа,  $f_m \geq 2,5$  МПа.

Розв'язані задачі опору монолітної кам'яної кладки з врахуванням особливостей напружено-деформованого стану:

а) при центральному та позацентровому стиску в умовах плоского напруженого стану:

$$\frac{N_{sh}}{A_c} = \sigma_1 = \frac{2k_{ei} \left( d\sqrt{1 + 3 \sin^2 \psi} - \bar{m} \sin \psi \right)}{1 - \sin \psi}, \quad (20)$$

де  $A_m$  – площа поперечного перерізу кам'яного елемента;  $k_{ei} = 1 - 2e_i / b$  – коефіцієнт, який враховує ексцентриситет  $e_i$  прикладання сили,  $b$  – ширина перерізу;  $d$  і  $m$  визначаються за міцністю кладки на стиск  $f_d$  і розтяг  $f_t$ ;

б) при сумісній дії вертикального  $N$  і горизонтального  $T$  навантаження:

$$\frac{N_{sh}}{A_c} = \left( \frac{d\sqrt{1+4\tan^2\psi'}}{\tan\psi'} - m \right) \frac{\tan(\gamma' + \psi') - \tan\gamma'}{[1 + \tan(\gamma' + \psi')\tan\beta]\tan\gamma'}. \quad (21)$$

Результати розрахунку приведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Значення  $\sigma = N / A_m$  при дії вертикальної та горизонтальної сили

Міцність цегли (каменю) $f_b$ , МПа	Міцність розчину $f_m$ , МПа	Опір кладки на стиск, $f_d$ , МПа	Напруження у цегляній кладці (МПа) при $T/N$				
			0,2	0,4	0,6	0,8	1
15	15	2,4	1,836	1,416	1,114	1,128	0,898
10	7,5	1,7	1,306	1,010	0,796	0,643	0,530
7,5	5	1,3	0,998	0,772	0,608	0,491	0,406
5	2,5	0,9	0,692	0,536	0,424	0,343	0,284

в) місцевому односторонньому та двосторонньому стисненні.

Встановлено вплив на опір бокового обтиснення й армування.

**Четвертий** розділ присвячено оцінюванню несучої здатності за нормальними перерізами залізобетонних і армокам'яних конструкцій, що згинаються, у випадку її втрати при руйнуванні бетону та кам'яної кладки стиснутої зони. Розглядаються залізобетонні конструкції, армовані високоміцною поздовжньою арматурою, та залізобетонні й армокам'яні конструкції, переармовані поздовжньою арматурою внаслідок пошкоджень бетону та кам'яної кладки стиснутої зони в ході експлуатації.

При застосуванні високоміцної арматури величина її деформації на початку верхньої гілки деформування значно перевищує деформацію в арматурі з фізичною площадкою текучості, а напруження підвищується при подальшому деформуванні. Вказане обумовлює збільшення висоти стиснутої зони та зростання величини відносної деформації крайньої стиснутої фібри в нормальному перерізі, котра може перевищити граничне значення для бетону та кам'яної кладки, що приводить до руйнування конструкцій у стиснутій зоні.

Для встановлення точки обмеження діаграми «напруження  $\sigma_c$  – деформації  $\varepsilon_c$ » бетону при стиску на низхідній гілці застосовується екстремальний принцип механіки деформівного твердого тіла, згідно якого дійсному напружено-деформованому стану із усіх статично можливих відповідає максимум прирощення напружень при деформуванні.

Величина відносної граничної деформації  $\varepsilon_{cR}$  визначається за найбільшим значенням середнього напруження  $\sigma_{cm}$  на заданих функцією  $\sigma_c = f(\varepsilon_c)$  ділянках деформування, що відповідає максимальному деформуванню без «макродеструктуризації» і знаходиться із рівняння:

$$\sigma_{cmR} = \max \left( \frac{\int_0^{\varepsilon_c} \sigma_c d\varepsilon_c}{\varepsilon_c} \right). \quad (22)$$

В якості розрахункових параметрів для бетонів за широкого інтервалу класів їх міцності зручно застосувати рівень деформації  $\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{c1}$ , де  $\varepsilon_{c1}$  – відносна деформація за максимальної величини напружень  $\sigma_{c,max}$ .

Граничний рівень відносної деформації бетону  $\eta_R$  визначається із рівняння:

$$\eta_R = \frac{1}{2k-4} \left[ \sqrt{\left( \frac{k^2 - 2k - 3}{2} \right)^2 + 4k^2 - 8k + \frac{k^2 - 2k - 3}{2}} \right], \text{ при } k \neq 2 \quad (23)$$

і  $\eta_R = 4/3$  за  $k = 2$ , де  $k$  приймається за ДБН В.2.6-98:2009.

Граничну відносну деформацію  $\varepsilon_{cR}$  можна безпосередньо встановити на діаграмі « $\sigma_c - \varepsilon_c$ » за максимальним значенням добутку рівня напружень  $\sigma_c / f_{cd}$ , де  $f_{cd}$  – розрахункове значення міцності бетону на стиск, і рівня деформації  $\eta$ .

Графіки залежності  $\sigma_{cm}$  і добутку  $\frac{\sigma_c}{f_{cd}} \eta$  для бетону класу С20/25 представлено на рис. 5.

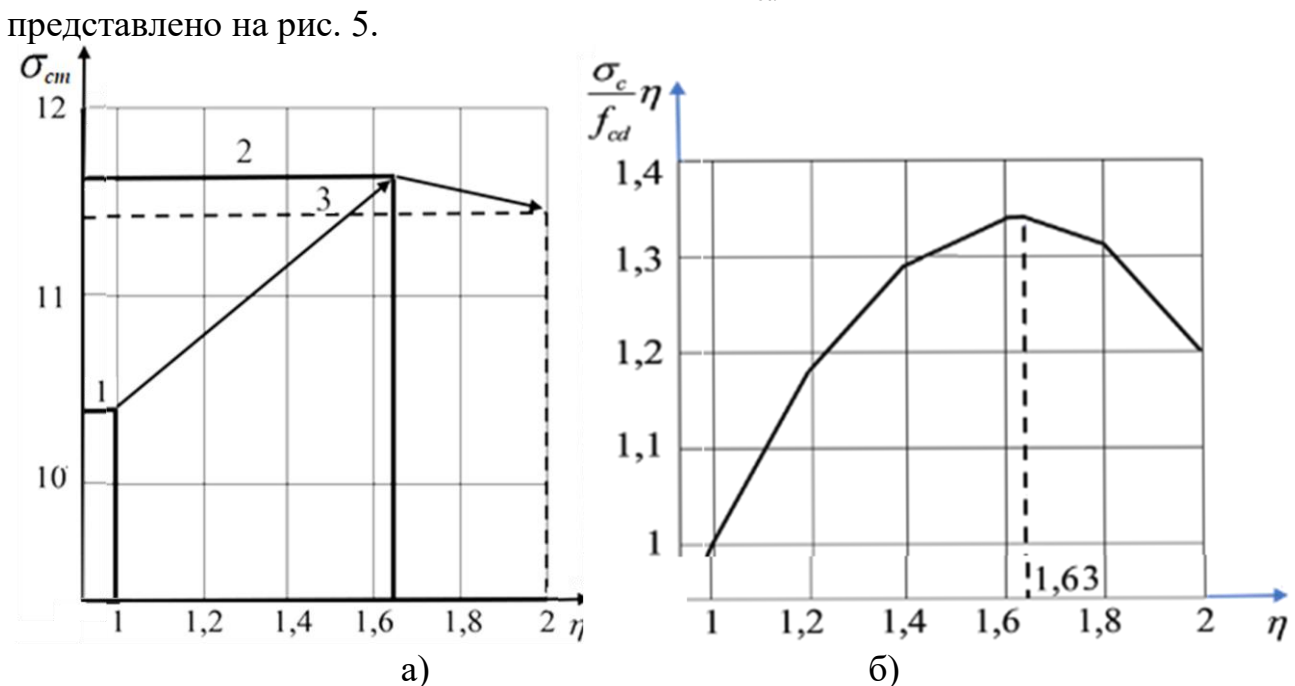


Рисунок 5 – Значення середніх напружень у бетоні  $\sigma_{cm}$  (МПа):

1 – в кінці висхідної гілки діаграми; 2 – при переході на низхідну гілку до точки обмеження рівня деформації; 3 – після неї (а); залежність добутку  $\frac{\sigma_c}{f_{cd}} \eta$

від рівня деформації  $\eta$  (б) для бетону класу С20/25

Для зручності застосування до обмеженої на низхідній гілці діаграми, описаної дробово-раціональною функцією, гармонізовано поліном 5-го степеня,

який надає можливість отримати достатньо прості залежності для визначення розрахункових параметрів стиснутої зони нормального перерізу (табл. 3).

Таблиця 3 – Значення  $\sigma_c/f_{cd}$  і  $\varepsilon_{cR,cd}$  у точці обмеження діаграми деформування та розрахункові параметри нормального перерізу при різних класах бетону

Клас міцності бетону	Параметри				
	$\sigma_c/f_{cd}$	$\varepsilon_{cR,cd}$ (‰)	$\eta_R$	$\omega_R$	$\chi_R$
C8/10	0,775	2,998	1,922	0,828	0,549
C12/15	0,791	2,859	1,809	0,819	0,546
C16/20	0,807	2,777	1,714	0,810	0,543
C20/25	0,823	2,684	1,627	0,801	0,541
C25/30	0,833	2,654	1,570	0,793	0,540
C30/35	0,843	2,625	1,526	0,786	0,539
C32/40	0,852	2,619	1,484	0,778	0,539
C35/45	0,860	2,609	1,450	0,771	0,539
C40/50	0,865	2,607	1,427	0,766	0,539
C45/55	0,874	2,604	1,393	0,758	0,539
C50/60	0,882	2,594	1,358	0,748	0,539

Для уникнення переоцінювання несучої здатності слід перевіряти умову  $\eta_u \leq \eta_R$ , де  $\eta_u$  встановлюється за максимуму згинального моменту  $M_{Rd}$ . При  $\eta_u > \eta_R$  в якості розрахункового параметра приймається  $\eta_R$ , котрий відповідає найбільшому зусиллю  $N_c$  на межі деформування без «макродеструктуризації».

На рис. 6 наведена розрахункова схема армованих поздовжньою високоміцною арматурою залізобетонних конструкцій прямокутного перерізу.

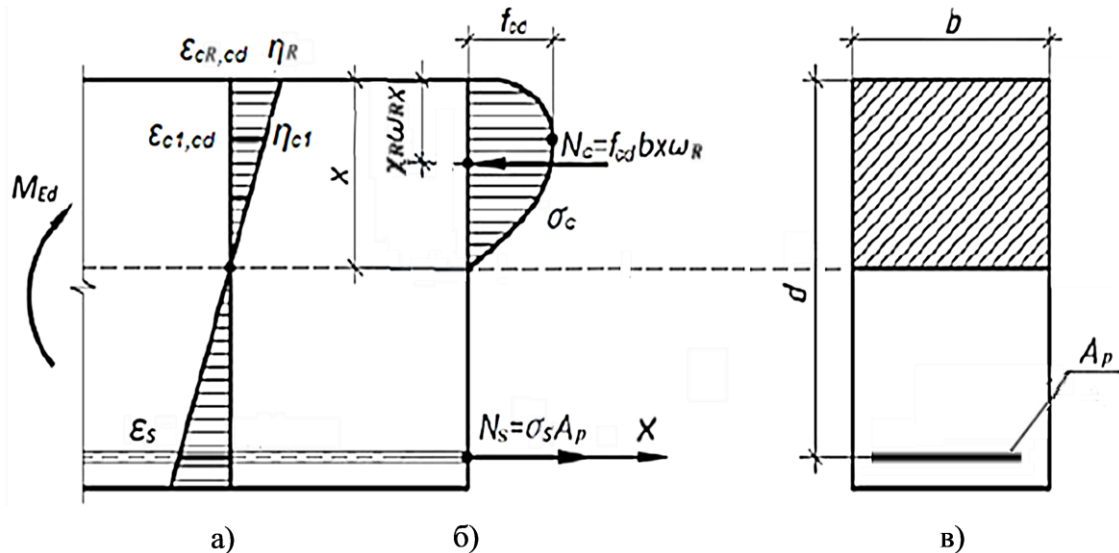


Рисунок 6 – Розрахункова схема до визначення несучої здатності у нормальному перерізі залізобетонної конструкції за досягнення деформацією бетону стиснутої зони граничного значення  $\eta_R$  ( $\varepsilon_{cR,cd}$ ): розподіл деформацій (а); напружень і зусиль (б); поперечний переріз (в)

Граничній деформації на діаграмі деформування відповідають максимальні значення коефіцієнта повноти епюри напружень у стиснутій зоні та зусилля, що сприймається стиснутим бетоном.

Розрахункові параметри  $\eta_R$ ,  $\omega$ ,  $\chi_R$  надані в табл. 3. Невідомими задачі виступають  $\sigma_{cm}$ ,  $\varepsilon_s$ ,  $\sigma_s$ ,  $N_c$ ,  $N_s$ ,  $x$ ,  $M_{Rd}$ , які знаходяться із системи рівнянь (24):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{cm} &= f(\sigma_c, \varepsilon_c) = f_{cd} \omega_R \\ N_c &= \int_{A_c} \sigma_c dA = \sigma_{cm} b x \\ \sigma_s &= f(\varepsilon_s, f_{pd}, \varepsilon_{s0}, f_{pk} / \gamma_s, \varepsilon_{uk}) \\ N_s &= \sigma_s A_p \\ \frac{x}{d} &= \frac{\varepsilon_{cR,cd}}{\varepsilon_{cR,cd} + \varepsilon_s} \\ \sum X &= 0: N_s - N_c = 0 \\ \sum M_z &= 0: M_{Rd} - N_c (d - \chi_R \omega_R x) = 0 \end{aligned} \right\}, \quad (24)$$

При застосуванні арматури класу А1000 і більш високої міцності на всьому інтервалі верхньої висхідної гілки діаграми їх деформування  $\eta_u > \eta_R$  (табл. 4).

Таблиця 4 – Параметри (характеристики) нормального перерізу та результати розрахунку залізобетонних конструкцій, що згинаються, при класі бетону С50/60 і арматурі класу А1000 за умови  $\varepsilon_{s0} = f_{pd} / E_p \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{ud} = 0,9\varepsilon_{uk}$

Параметри (характеристики) нормального перерізу	Характеристики бетону: $f_{cd}=33$ МПа, $\varepsilon_{cR,cd}$ , $\omega_R$ , $\chi_R$ (табл. 3)								
	Характеристики арматури: $f_{pd}=795,83$ МПа, $\varepsilon_{s0} = 4,189$ ‰, $\varepsilon_{pk}/\gamma_s = 875$ МПа, $\varepsilon_{uk}=18$ ‰, $\varepsilon_{ud}=16,2$ ‰								
	Коефіцієнт армування $\rho_1$ , ‰								
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
$\eta_R^*$	1,358								
$\varepsilon_s$ , ‰	15,95	12,58	10,25	8,55	7,25	6,22	5,384	4,69	4,11
$\sigma_s$ , МПа	863,3	843,9	830,6	820,8	813,4	807,5	802,7	798,7	795,4
$\bar{\xi} = x/d$	0,140	0,171	0,202	0,233	0,264	0,294	0,325	0,356	0,387
$\xi = \bar{\xi}\omega$	0,105	0,128	0,151	0,174	0,197	0,220	0,243	0,266	0,289
$\alpha_m^{**}$	0,099	0,119	0,139	0,158	0,176	0,194	0,211	0,228	0,244

\* – при  $\rho_1 = 0,4$  ‰ рівень деформації бетону крайньої стиснутої фібри  $\eta_u = 1,754$ ,

за  $\rho_1 = 1,2$  ‰ –  $\eta_u = 1,384$ , що перевищує рівень  $\eta_R$ ; \*\* –  $M_{Rd} = \alpha_m f_{cd} b d^2$

Також визначена залишкова несуча здатність залізобетонних і армокам'яних конструкцій, переармованих поздовжньою арматурою з використанням рівня відносної граничної деформації  $\eta_R$ .

**П'ятий** розділ присвячено оцінюванню несучої здатності конструкцій на основі розривних рішень при домінуванні деформації зсуву.

Розрахунок несучої здатності залізобетонних балок за похилими перерізами виконано на основі поєднання «фермової аналогії» та «дискової моделі» і базується на результатах розв'язку задач опору армованої похилої стиснутої смуги (рис. 7, а) та ділянки біля опори за небезпечною похилою тріщиною з урахуванням роботи клиновидної стиснутої зони (рис. 7, б).

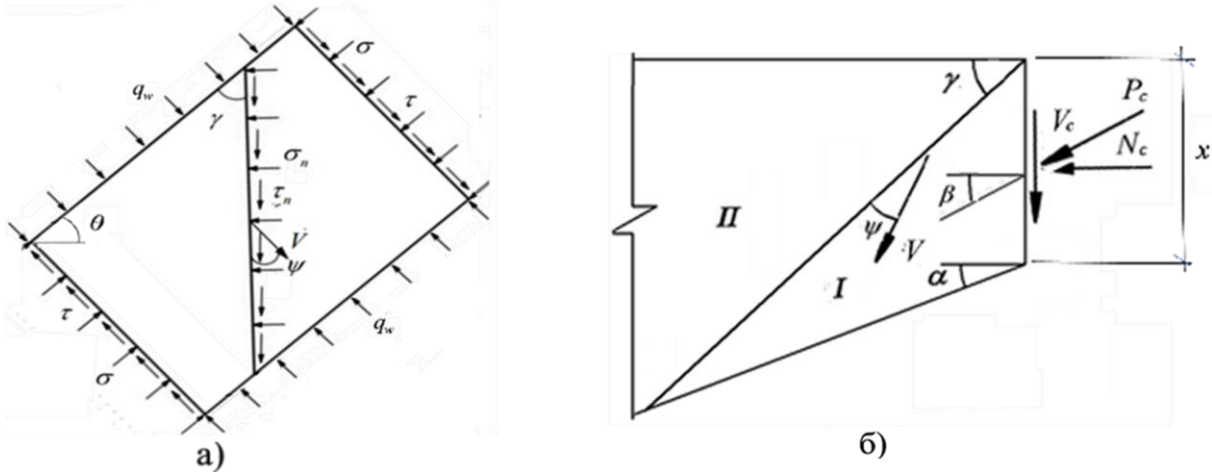


Рисунок 7 – До визначення зусиль в: армованій похилій смугі (умовному елементі «фермової аналогії») (а); клиноподібній бетонній зоні над небезпечною тріщиною (елементі «дискової моделі») (б)

Гранична величина нормальних напружень  $\sigma$  із врахуванням впливу дотичних  $\tau$  і армування визначається із рівняння:

$$\sigma = \left( \frac{\tan(\gamma' + \psi')}{\tan \gamma'} - 1 \right) \left( \frac{d\sqrt{1 + 4 \tan^2 \psi'} - m}{\tan \psi'} - m \right) \frac{1 + k_\sigma}{1 + \tan(\gamma' + \psi') \tan \beta}, \quad (25)$$

де  $k_\sigma = \frac{q_w \tan(\gamma' + \psi')}{f_c \tan \gamma'}$  – коефіцієнт, який враховує вплив армування.

На основі отриманих результатів зусилля  $V_{Rd, \max}$  при поперечному (вертикальному) армуванні визначається із рівняння:

$$V_{Rd1} = \frac{\varphi_w b_w z v_1 f_{cd}}{1 + \cot \theta}, \quad (26)$$

де  $\varphi_w$  – коефіцієнт, який враховує вплив армування;  $b_w$  – мінімальна ширина поперечного перерізу;  $z$  – плече внутрішньої пари сил;  $v_1=0,6$  – коефіцієнт зменшення міцності бетону з тріщинами;  $\theta$  – кут між стиснутим умовним елементом та поздовжньою віссю балки.

Коефіцієнт  $\varphi_w$  визначається за виразом:

$$\varphi_w = 1 + 5 \frac{E_s}{E_{cd}} \frac{A_{sw}}{b_w s} \leq 0,3, \quad (27)$$

де  $E_s$  і  $E_{cd}$  – розрахункові значення модуля пружності арматурної сталі та бетону;  $A_{sw}$  і  $s$  – площа поперечного перерізу і крок арматури.

Рівнодійне зусилля  $P_c$ , що сприймає клиноподібна стиснута зона:

$$\frac{P_c}{f_c A_c} = \frac{\tan(\gamma' + \psi') - \tan \gamma'}{\tan \gamma' - \tan \alpha} \left( \frac{d \sqrt{1 + 4 \tan^2 \psi'}}{\tan \psi'} - m \right) \frac{\sqrt{1 + \tan^2 \beta}}{1 + \tan(\gamma' + \psi') \tan \beta}, \quad (28)$$

де  $A_c = bx$  – площа усіченої грані клину, тут  $b$  – ширина поперечного перерізу;  $x$  – висота усіченої грані;  $\beta$  – кут напрямку рівнодійної  $P_c$ .

Значення відносної висоти стиснутого бетону над похилою тріщиною  $x/z$  та кута нахилу тріщини (кута клину)  $\alpha$  визначається величиною  $\cot \theta$  (обрисом тріщини).

Гранична величина зусилля  $V_c$  у похилому перерізі при розрахунку за небезпечною тріщиною на дію поперечної сили встановлюється із рівняння:

$$\frac{V_c}{f_c A_c} = \frac{\tan(\gamma' + \psi') - \tan \gamma'}{\tan \gamma' - \tan \alpha} \left( \frac{d \sqrt{1 + 4 \tan^2 \psi'}}{\tan \psi'} - m \right) \frac{\tan \beta}{1 + \tan(\gamma' + \psi') \tan \beta}. \quad (29)$$

Величину поперечного зусилля, що сприймає бетон над небезпечною похилою тріщиною, пропонується підраховувати як:

$$V_c = \frac{0,16 \varphi_{c\theta} f_{cd} b_w z}{\cot^2 \theta}, \quad (30)$$

де  $\varphi_{c\theta} = 1$  за умови  $1 < \cot \theta \leq 2$ ;  $\varphi_{c\theta} = 3 - \cot \theta$  при  $2 < \cot \theta \leq 2,5$ .

Граничне зусилля, що сприймають балкові залізобетонні конструкції прямокутного поперечного перерізу на дію поперечної сили за небезпечною похилою тріщиною (рис. 8), визначається як сума поперечних зусиль, які сприймають вертикальна арматура та стиснута зона бетону:

$$V_{Rd2} = \frac{0,16 \varphi_{c\theta} f_{cd} b_w z}{\cot^2 \theta} + \frac{f_{ywd} A_{sw}}{s} z \cot \theta, \quad (31)$$

де  $f_{ywd}$  – розрахункове значення міцності поперечної арматури на розтяг.

Кут  $\theta$  залежить від відношення  $c/z$  і встановлюється із рівняння:

$$\cot \theta = (c/z)^{0,7}. \quad (32)$$

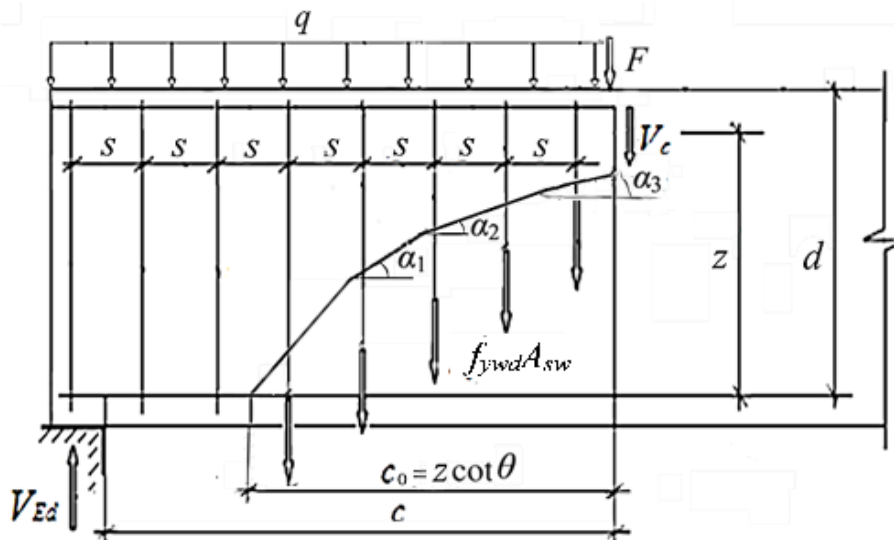


Рисунок 8 – Розрахункова схема балкової конструкції за похилою тріщиною:

$\alpha_3$  ( $\alpha_{1,2}$ ) – кут клину стиснутої зони в розрахунковому перерізі



За несучу здатність конструкції приймається менша із величин  $V_{Rd}$  з урахуванням в обох випадках впливу як бетону, так і поперечної арматури.

Визначена несуча здатність коротких залізобетонних консолей. У межах стиснутої смуги, котра визначає опір консолі на дію поперечної сили  $V_u$ , реалізується зсув. Кінематична схема армованої смуги та розрахункова схема консолі наведені на рис. 9.

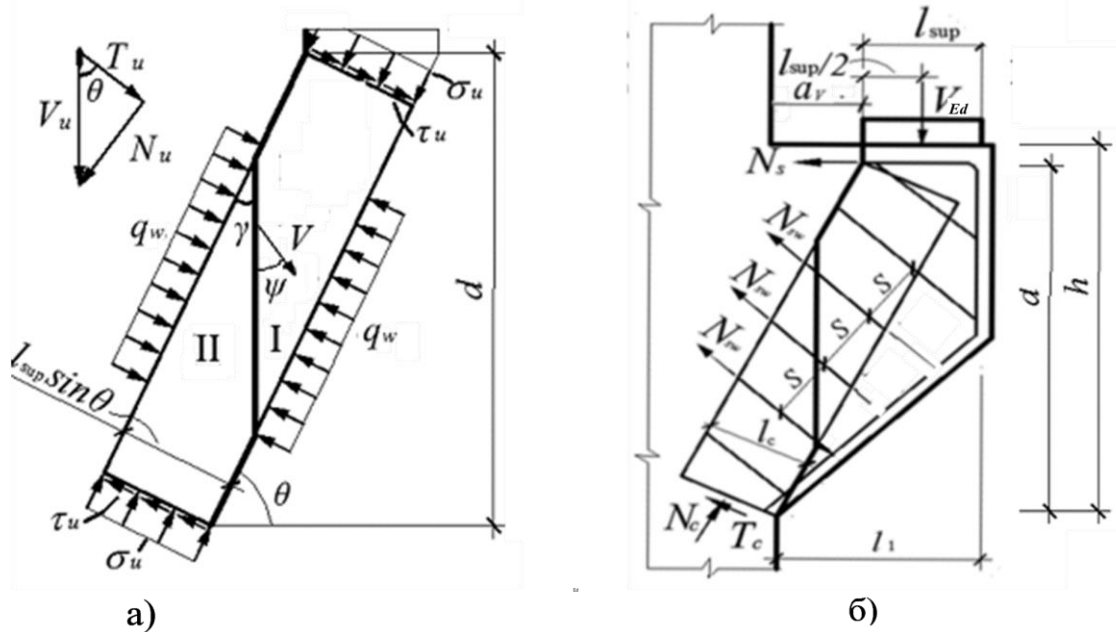


Рисунок 9 – Кінематична схема руйнування залізобетонної похилої смуги як елемента короткої консолі (а); розрахункова схема залізобетонної консолі (б)

Несуча здатність короткої консолі визначається із рівняння:

$$V_{Rd} = (1 - l_1 / d + \alpha_s) f_{cd} b_w l_{sup} (1 + \alpha_{sw}), \quad (33)$$

де  $\alpha_s = \bar{t} \rho_1 \sin \theta$  – коефіцієнт, який враховує вплив поздовжньої арматури;  $\bar{t} = 1,5 \alpha d / l_c$ , тут  $\alpha = E_s / E_{cd}$ ,  $l_c = l_{sup} \sin \theta$ ;  $\rho_1 = \frac{A_s}{bd}$ ;  $\sin \theta = \sqrt{\frac{d^2}{d^2 + l_1^2}}$ ;

$\alpha_{sw} = \bar{t} \frac{A_{sw}}{bs}$  – коефіцієнт, що враховує вплив хомутів.

Розроблено метод розрахунку граничних зусиль при місцевому стиску опорних ділянок, встановлені області його реалізації.

Кінематична схема руйнування в умовах об'ємного напруженого стану наведена на рис. 10, а.

Напруження в бетоні при місцевому стисненні визначається за залежністю:

$$\frac{f_{cd,loc}}{f_{cd}} = \frac{1}{2 \tan \gamma} \left\{ \frac{d^2}{\bar{m}} \tan(\psi' + \gamma') + \frac{m}{4} \left[ \frac{(1 + \tan(\psi' + \gamma') \tan \gamma')^2}{(\psi' + \gamma') - \tan \gamma'} + \frac{1 + \tan(\psi' + \gamma')^2 (1 + \delta^2 \tan^2 \gamma')}{\delta^2 \tan \gamma'} \right] + \chi \frac{\tan(\psi' + \gamma') (\alpha_1 \alpha_2 \tan \gamma')}{\delta} - 1 \right\}, \quad (34)$$

де  $\delta = l_{loc} / b_{loc}$ ,  $\alpha_1 = 2b / b_{loc}$ ,  $\alpha_2 = 2h / b_{loc}$ .

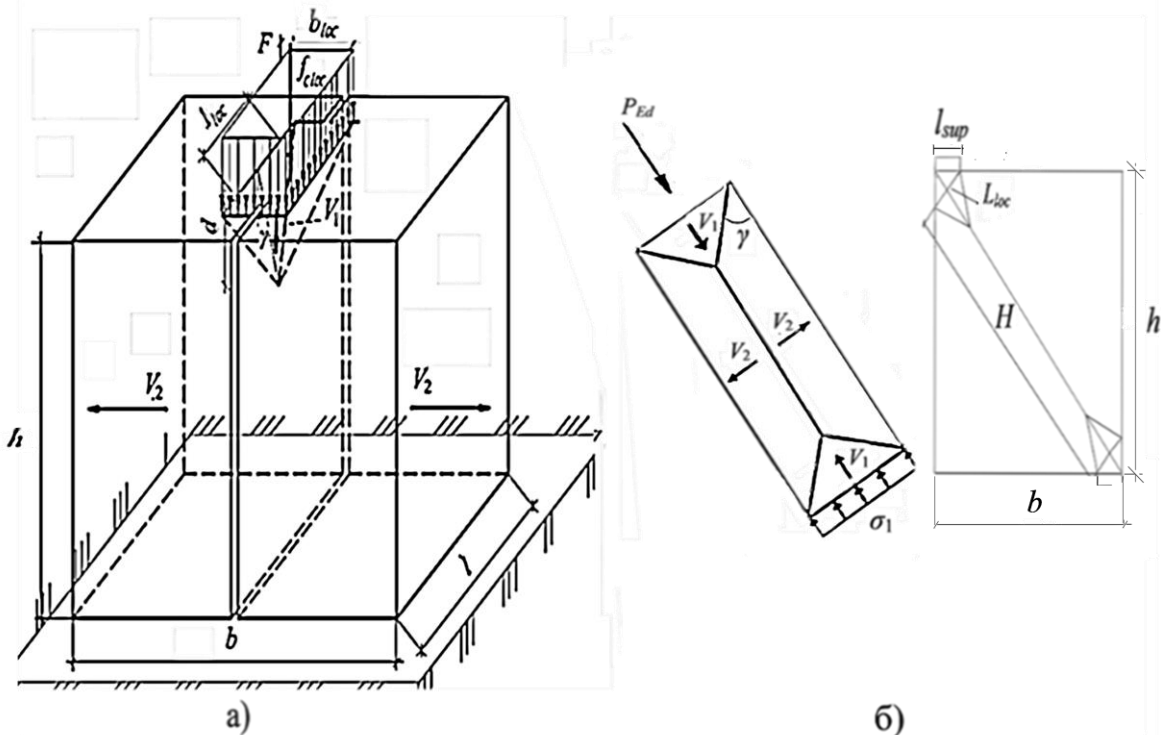


Рисунок 10 – Кінематичні схеми: опори за місцевого стиснення (а); протінка при діагональному розколюванні (б)

Запропонована методика розрахунку несучої здатності кам'яних конструкцій при сумісній дії горизонтального (сейсмічного  $S_{Ed}$ ) та вертикального  $N_{Ed}$  навантаження.

Залежність для визначення вертикального зусилля при діагональному розколюванні має вигляд:

$$N_{Rd} = \frac{k_m f_d l_{sup} t}{S_{Ed} / N_{Ed}}, \quad (35)$$

де  $k_m = (0,8 + 2f_t / f_d)(h / l_{sup} - 1)^{0,2}$  – коефіцієнт, який враховує вплив міцності кладки на розтяг та відношення  $h / l_{sup}$  на величину граничного опору.

Встановлена область реалізації руйнування при діагональному розколюванні (рис. 10, б).

Визначена несуча здатність за похилим перерізом балкових армокам'яних конструкцій без поперечного армування.

У шостому розділі наведені результати порівняння підрахованих згідно запропонованих методів величин опору елементів і несучої здатності конструкцій з експериментальними даними, отриманими автором та іншими дослідниками за різних видів напружено-деформованого стану.

Характер руйнування бетонних призм і кам'яних стовпів за осьового стиску при реалізації зсуву в одній або двох площинах, зразків для дослідження напрямку локалізованої пластичної деформації, кубів і призм при місцевому стиску та клиновидних зразків на сумісну дію вертикальних і горизонтальних сил, наведений на рис. 11–14, підтверджує прийняті кінематичні схеми.

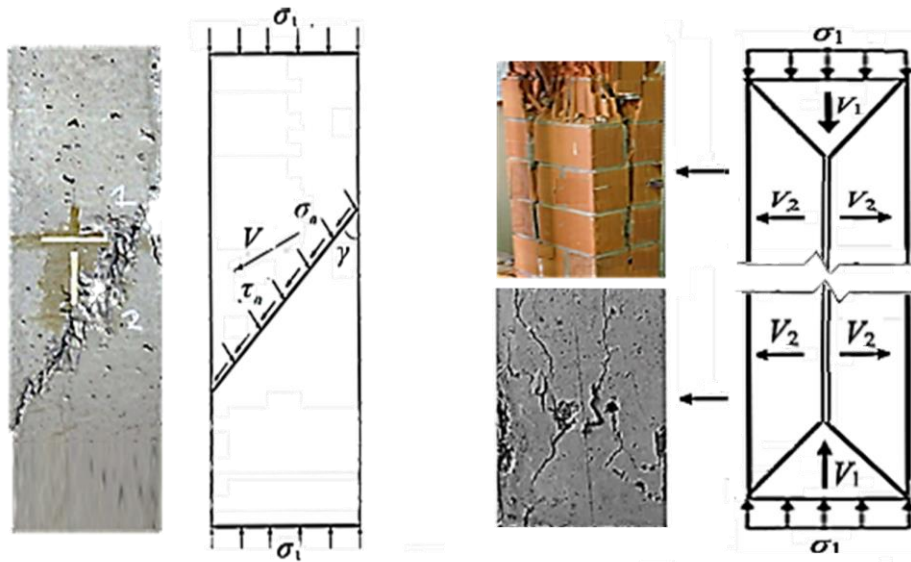


Рисунок 11 – Характер руйнування і кінематичні схеми при одновісному стиску

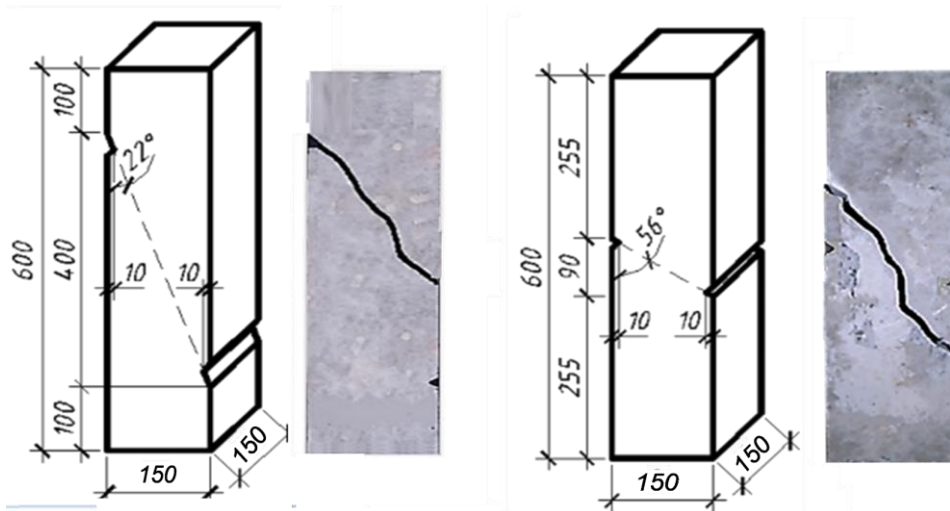


Рисунок 12 – Бетонні призми з вирізами на бокових поверхнях

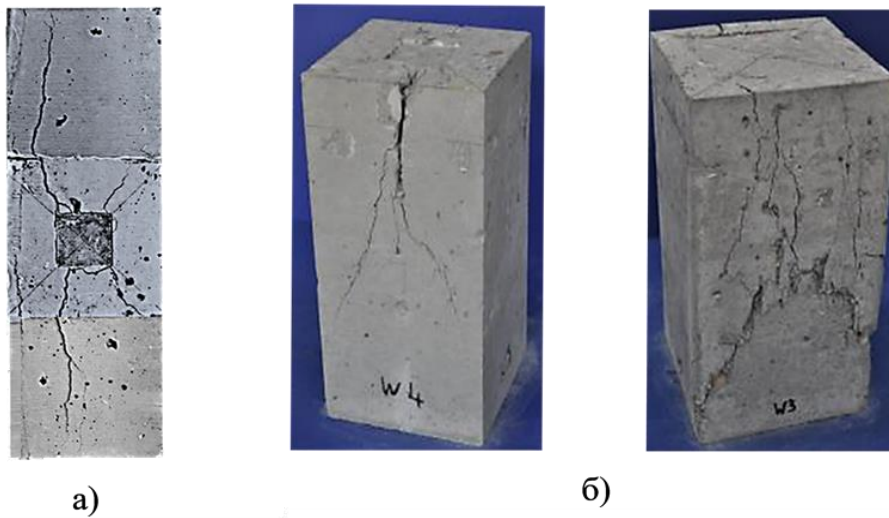


Рисунок 13 – Характер руйнування при місцевому стиску: бетонних кубів (розгортка) (а) і призм (б)

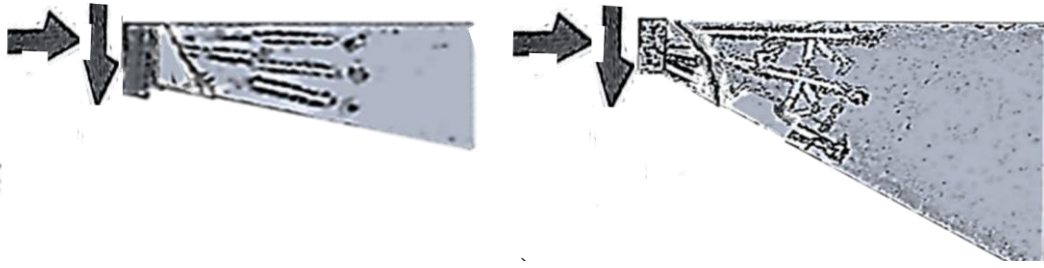


Рисунок 14 – Характер руйнування усічених клинів – моделей стиснутої зони

Випадок руйнування клиновидних зразків, які моделюють стиснуту зону бетону над небезпечною похилою тріщиною, знайшов експериментальне підтвердження в дослідженнях балкових залізобетонних (рис. 15) та армокам'яних конструкцій при дії поперечної сили.

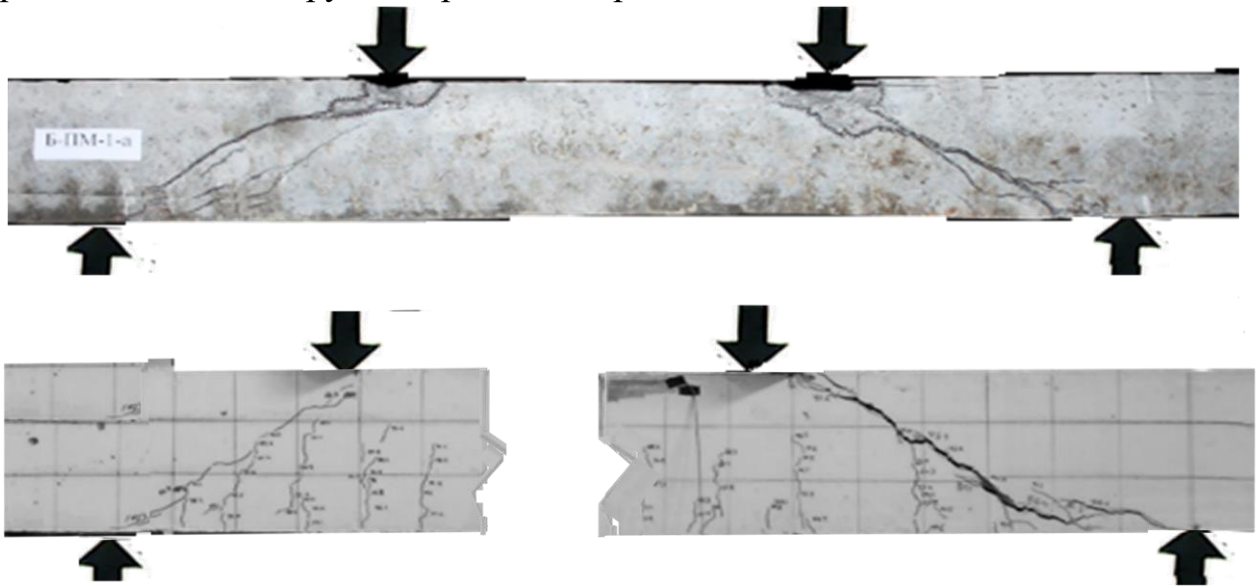
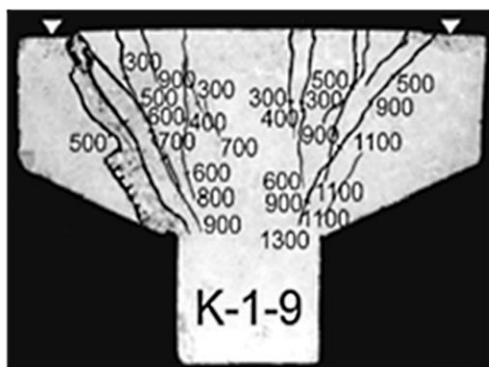
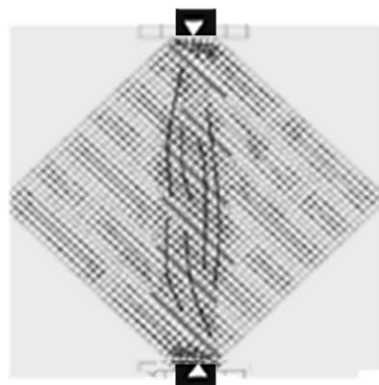


Рисунок 15 – Картина руйнування балок за похилими перерізами

Похила смуга, як найбільш напружена область, реалізується в коротких залізобетонних консолях та при діагональному розколюванні кам'яних стін (рис. 16).



а)



б)

Рисунок 16 – Картина руйнування: дослідних зразків коротких консолей (а); кам'яної кладки при діагональному розколюванні (б)

Отримані статистичні показники співставлення результатів визначення опору елементів та несучої здатності конструкцій (табл. 5) підтверджують достовірність теоретичних рішень.

Таблиця 5 – Статистичні показники порівняння отриманих теоретичних результатів з експериментальними даними

Дослідні зразки	Кількість зразків	Середнє арифметичне	Середнє квадратичне	Коефіцієнт варіації, %
Бетонні пластинки при двовісному стиску	6	$\sigma_1^{calc} / \sigma_1^{test} = 1,015$	0,074	7,28
Призми з ослабленим перерізом	5	$N^{calc} / N^{test} = 0,973$	0,126	12,91
Залізобетонні усічені клини при сумісній дії вертикальної та горизонтальної сил	34	$P^{calc} / P^{test} = 0,965$	0,082	8,45
Моделі стиснутої зони над похилою тріщиною залізобетонних балок	43	$P^{calc} / P^{test} = 0,889$	0,110	12,43
Залізобетонні балки, що руйнуються за нормальним перерізом	9	$M^{calc} / M^{test} = 0,943$	0,100	10,65
Балки, що руйнуються за похилим перерізом	16	$V^{calc} / V^{test} = 0,922$	0,072	7,85
Залізобетонні короткі консолі	17	$V^{calc} / V^{test} = 0,97$	0,116	11,98
Бетонні опори при місцевому стиску	29	$f^{calc} / f^{test} = 1,01$	0,186	18,39
Кам'яні зразки при діагональному розколюванні	27	$f(P)^{calc} / f(P)^{test} = 0,989$	0,139	14,05
Загальна кількість зразків	186			

Аналіз отриманих за запропонованими та нормативними методами результатів розрахунку залізобетонних і кам'яних конструкцій засвідчує доцільність уточнення норм шляхом урахування додаткових факторів впливу.

У цьому розділі приведені розроблені на основі отриманих з використанням умов екстремуму деформування результатів інженерні методи визначення несучої здатності залізобетонних і кам'яних конструкцій за різних напружено-деформованих станів за уточненими розрахунковими схемами і залежностями, а також викладені матеріали удосконалення конструктивних рішень та оцінювання залишкового ресурсу конструкцій.

Запропоновані методи розрахунку несучої здатності: за нормальними перерізами армованих високоміцною поздовжньою арматурою залізобетонних конструкцій, що згинаються, з використанням верхньої висхідної гілки діаграми деформування арматури; переармованих поздовжньою арматурою внаслідок пошкодження стиснутої зони балкових залізобетонних і армокам'яних конструкцій; балок за похилими перерізами, коротких консолей, кам'яних простінків при дії горизонтальних (сейсмічних) сил, бетонних і кам'яних опор на місцевий стиск.

Гранична величина згинального моменту  $M_{Rd}$ , котра сприймається армованими високоміцною поздовжньою арматурою балковими залізобетонними конструкціями, визначається на основі деформаційної моделі з використанням наведеної на рис. 6 розрахункової схеми за рівнянням:

$$M_{Rd} = \bar{\xi} \omega_R (1 - 0,54 \bar{\xi} \omega_R) f_{cd} b d^2, \quad (36)$$

де  $\bar{\xi} = \rho_1 \frac{\sigma_s}{f_{cd} \omega_R}$  – відносна висота стиснутої зони в нормальному перерізі;

$\rho_1$  – коефіцієнт поздовжнього армування;  $\sigma_s$  – напруження в арматурі;  $\omega_R = 0,85 - 0,003 f_{cd}$  – коефіцієнт повноти епюри напружень;  $\chi_R = 0,54$ .

Для встановлення величини напружень в арматурі  $\sigma_s$  підраховується значення відносної деформації арматури  $\varepsilon_s$  за залежністю:

$$\varepsilon_s = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ \frac{f_{pd} (\varepsilon_{sk} - \varepsilon_{s0})}{f_{pk} / \gamma_s - f_{pd}} - \varepsilon_{s0} + \varepsilon_{cR,cd} \right]^2} + \varepsilon_{cR,cd} \left[ \varepsilon_{s0} + \frac{\varepsilon_{sk} - \varepsilon_{s0}}{f_{pk} / \gamma_s - f_{pd}} \left( \frac{f_{cd} \omega_R}{\rho_1} - f_{pd} \right) \right] - \frac{1}{2} \left[ \frac{f_{pd} (\varepsilon_{sk} - \varepsilon_{s0})}{f_{pk} / \gamma_s - f_{pd}} - \varepsilon_{s0} + \varepsilon_{cR,cd} \right], \quad (37)$$

де:  $f_{pd}$ ,  $\varepsilon_{s0}$  і  $f_{pk} / \gamma_s$ ,  $\varepsilon_{uk}$  – значення напружень і відносної деформації відповідно на початку та в кінці верхньої висхідної гілки деформування арматури,  $\varepsilon_{s0} = f_{pd} / E_p$ , тут  $E_p$  – модуль пружності високоміцної арматури;  $\gamma_s$  – коефіцієнт надійності для арматури;  $\varepsilon_{cR,cd} = 2,5 \text{ ‰}$  – величина граничної відносної деформації бетону при класах міцності C30/35 і вище, котрі розповсюджені при застосуванні високоміцної арматури.

Перевіряється відповідність отриманого значення відносної деформації  $\varepsilon_s$  на інтервалі верхньої висхідної гілки діаграми деформування високоміцної арматури із умови:

$$\varepsilon_{s0} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{ud} = 0,9 \varepsilon_{uk}, \quad (38)$$

де  $\varepsilon_{ud}$  – значення граничної розрахункової відносної деформації арматури.

У разі невиконання умови (38) при проектуванні змінюється коефіцієнт  $\rho_1$  до її виконання, тоді напруження в арматурі дорівнюють:

$$\sigma_s = f_{pd} + \left( \frac{f_{pk}}{\gamma_s} - f_{pd} \right) \frac{\varepsilon_{su} - \varepsilon_{s0}}{\varepsilon_{uk} - \varepsilon_{s0}}. \quad (39)$$

Для зручності проектування запропонована залежність, що дозволяє встановити величину напруження  $\sigma_s$  за коефіцієнтом поздовжнього армування  $\rho_1$ :

$$\sigma_s = f_{pd} + \left( \frac{f_{pk}}{\gamma_s} - f_{pd} \right) \left( \frac{\rho_{s,\max} - \rho_1}{\rho_{s,\max} - \rho_{s,\min}} \right)^{0,8}, \quad (40)$$

$$\text{де } \rho_{s,\max} = \frac{\varepsilon_{cR,cd}}{\varepsilon_{cR,cd} + \varepsilon_{s0}} \frac{f_{cd} \omega_R}{f_{pd}}, \quad \rho_{s,\min} = \frac{\varepsilon_{cR,cd}}{\varepsilon_{cR,cd} + \varepsilon_{ud}} \frac{f_{cd} \omega_R}{\sigma_{s,\max}},$$

$$\sigma_{s,\max} = f_{pd} + \left( \frac{f_{pk}}{\gamma_s} - f_{pd} \right) \left( \frac{\varepsilon_{ud} - \varepsilon_{s0}}{\varepsilon_{uk} - \varepsilon_{s0}} \right)^{0,8} \rho_1 \text{ у } \%. \quad (41)$$

При проектуванні конструкцій  $\rho_1$  приймається в межах:

$$\rho_{s,\min} \leq \rho_1 \leq \rho_{s,\max}. \quad (41)$$

При оцінюванні залишкової несучої здатності залізобетонних конструкцій, які внаслідок пошкодження бетону стиснутої зони або зниження його міцності  $f_{cd}$  в ході експлуатації перейшли до категорії перearмованих, деформація в поздовжній арматурі визначається із рівняння:

$$\varepsilon_s = \sqrt{\left( \frac{\varepsilon_{cR,cd}}{2} \right)^2 + \frac{\varepsilon_{cR,cd} f_{cd} \omega_R}{\rho_1 E_p (E_s)} - \frac{\varepsilon_{cR,cd}}{2}}, \quad (42)$$

де  $\varepsilon_{cR,cd}$  приймається: 2,9 ‰ при класах міцності бетону C8/10 і C12/15; 2,7 ‰ для класів міцності C16/20, C20/25 і C25/30; 2,5 ‰ при класах від C30/35 до C50/60.

Напруження в арматурі дорівнюють:

$$\sigma_s = \varepsilon_s E_p (E_s). \quad (43)$$

Несуча здатність визначається із рівняння:

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} = \sigma_s A_s (d - 0,54 \frac{\sigma_s A_s}{f_{cd} b}). \quad (44)$$

Величина згинального моменту  $M_{Rd}$ , що сприймає армокам'яна конструкція прямокутного поперечного перерізу, дорівнює:

$$M_{Rd} = f_{yd} A_s (d - 0,53 \frac{f_{yd} A_s}{f_d b}). \quad (45)$$

Для уникнення перearмування повинна виконуватися умова:

$$M_{Rd} \leq \alpha_{mR} f_d b d^2, \quad (46)$$

де  $\alpha_{mR} = \bar{\xi}_R (0,8 - 0,35 \bar{\xi}_R)$ , тут  $\bar{\xi}_R = \frac{f_{yd} A_s}{f_d \omega_R b d}$ ,  $f_{yd}$  – розрахункове значення міцності поздовжньої арматури на розтяг;  $\omega_R = 0,8$  при  $\eta_R = 1,63$ ;  $\omega_R^2 \chi_R = 0,35$ .

Для армокам'яних конструкцій гранична величина  $\alpha_{Rm}$  складає при застосуванні елементів групи 1 і арматури класів A240C, A400C, за  $\varnothing 8 \dots 22$  мм

A500C та B500 відповідно: 0,41; 0,39; 0,38 і 0,37. Величина згинального моменту  $M_{Rd}$ , що сприймає переармована внаслідок пошкодження кладки стиснутої зони у нормальному перерізі конструкція, визначається з використанням наведеної на рис. 6 розрахункової схеми з характеристиками міцності кам'яної кладки та звичайної арматури із рівняння:

$$M_{Rd} = \varepsilon_s E_s A_s (d - 0,43 \bar{\xi}_R). \quad (47)$$

Несуча здатність кам'яної стіни при сумісній дії вертикального  $N_{Ed}$  та горизонтального  $T_{Ed}$  навантаження визначається із рівняння:

$$N_{Rd} = \left[ 1 - (0,7 T_{Ed} / N_{Ed})^{0,6} \right] b t f_d, \quad (48)$$

де  $b$  і  $t$  – ширина та товщина конструкції.

Зусилля  $F_{Rdu}$ , що сприймає бетонна опора на місцевий стиск:

$$F_{Rdu} = k_{loc} \sqrt{A_{c1} A_{c0}} f_{cd}, \quad (49)$$

тут  $k_{loc} = 1 + \alpha_{loc} \beta_{loc} f_{ctd} / f_{cd}$  – коефіцієнт, який враховує геометричні характеристики та співвідношення міцності бетону на розтяг і стиск;  $A_{c0} = b_{loc} l_{loc}$  – площа передачі навантаження, тут  $b_{loc}$  і  $l_{loc}$  – ширина і довжина площадки навантаження;  $A_{c1} = b_{cal} l_{cal}$  – розрахункова площа, тут  $b_{cal}$  і  $l_{cal}$  – ширина та довжина, котрі не перевищують  $4b_{loc}$  і  $4l_{loc}$ ;  $\alpha_{loc} = (4b_{loc} / b_{cal})^3$  і  $\beta_{loc} = (b_{cal} - b_{loc}) / b_{cal}$ .

Розрахункова величина граничного вертикального зусилля  $N_{Rdc}$ , котре сприймає зведена із елементів групи 1 кам'яна стіна (пілястра або опора) при дії на конструкцію зосередженого навантаження  $N_{Ed}$ , визначається із рівняння:

$$N_{Rdc} = \beta_m A_b f_d, \quad (50)$$

де  $\beta_m = (1 + f_t / f_d) \sqrt[4]{h_c / l_{loc}} \leq 1,5$  – коефіцієнт збільшення несучої здатності, тут  $f_t$  – міцність кам'яної кладки на осьовий розтяг,  $h_c$  – висота конструкції;  $A_b = l_{loc} t$  – площа передачі навантаження.

Розрахунки несучої здатності залізобетонних балок за похилими перерізами та коротких консолей виконуються за залежностями (26), (31) і (33).

Удосконалено несучі залізобетонні конструкції: 15-ти метрова балка з поперечним перерізом європейського типу (зниження поздовжнього армування на 9%); монолітні ригелі плоских міжповерхових перекриттів житлових та громадських будівель (зниження інтенсивності поперечного армування до 20 %); стики колон безбалково-безконсольної конструктивної системи будівель (підвищення експлуатаційної придатності).

Для уникнення руйнування кам'яних простінків шляхом діагонального розколювання при сейсмічних впливах за результатами визначення несучої здатності простінків та встановлення межі реалізації діагонального розколювання монолітної кладки надані конструктивні заходи щодо його унеможливлення, а саме необхідно приймати:

- довжину площадки спірання перемички  $l_{sup}$  на простінок не менше 1/4 висоти простінка  $h$ ;



- ширину простінка  $b$  не менше ніж  $b = h + 250$  мм, що дозволяє збільшити довжину розрахункового перерізу.

Встановлено залишковий ресурс та надані пропозиції щодо відновлення експлуатаційної придатності: фундаменту під технологічне обладнання при місцевій дії навантаження; залізобетонного ригеля несучої рами трибуни стадіону при пошкодженні стиснутої зони у нормальному перерізі; цегляного стовпа адміністративного корпусу при зменшенні площадки передачі навантаження.

### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена важлива науково-технічна проблема оцінювання несучої здатності залізобетонних і кам'яних конструкцій на загальній теоретичній основі з використанням умов екстремуму деформування, що дозволило врахувати особливості напружено-деформованого стану при зсуві, уникнути перевищення відносно деформацією бетону і кам'яної кладки стиснутої зони граничної величини за нормальним перерізом при згині, запропонувати інженерні методи розрахунку і підвищити ефективність проектування за рахунок уточнення розрахункових схем і залежностей, удосконалити конструктивні рішення та відновити експлуатаційну придатність конструкцій. Сформульовані висновки, котрі відображають результати дисертаційної роботи.

1. На основі проведеного аналізу методів теорії пластичності підтверджена можливість ефективного застосування її математичного апарату, варіаційного числення та екстремальних принципів для оцінювання несучої здатності залізобетонних і кам'яних конструкцій.

2. Адаптовано класичний математичний апарат теорії пластичності при застосуванні концепції жорстко-пластичного тіла та розривних рішень для розв'язку задач опору бетонних і кам'яних елементів в умовах плоского напруженого стану та плоскої деформації. Необхідність корегування апарату пов'язана з особливостями властивостей бетону та кам'яної кладки порівняно з пластичними матеріалами: значною різницею міцності на стиск і розтяг та збільшенням їх об'єму в граничному стані. Використовується умова міцності, котра відображає вказану різницю, узагальнює умови міцності Мізеса – Генки та Мора на квазікрихкі матеріали, геометрично представляє собою параболоїд обертання в координатах головних нормальних напружень, має просту форму запису і приймається в якості умови текучості. Для врахування дилатансії розглядаються стрибки швидкості як у дотичному, так і у нормальному до поверхні руйнування напрямках.

3. Адаптований математичний апарат теорії пластичності перевірено при розв'язанні задач міцності бетонних пластинок в інтервалах напружених станів двовісного й одновісного стиску та змішаних напружень за дійсних площин ковзання. Використано функціонал принципу віртуальних швидкостей  $J$ , який досліджується на стаціонарний стан за допомогою варіаційного рівняння  $\delta J = 0$ . В якості параметра варіювання прийнято кут  $\psi$  між напрямком руху жорстких дисків та поверхнею руйнування, котрий відповідає куту дотичної до

умови міцності. Бетон і кам'яна кладка розглядаються як жорстко-пластичне тіло. Спрямована пластична деформація локалізується у тонких шарах  $\Delta l \rightarrow 0$  на поверхні руйнування, сусідні області вважаються жорсткими. Отримані в результаті розрахунку величини напружень дорівнюють напруженням на прийнятій умові міцності при плоскому напруженому стані та плоскій деформації.

4. Встановлені сполучення значень міцності цегли (каменя правильної форми) і розчину, за яких при умові дотримання технології зведення, кам'яна кладка може вважатися монолітною і розрахунковий переріз проходить за цеглою (каменем):  $f_b=15$  МПа і  $f_m \geq 15$  МПа;  $f_b=10$  МПа і  $f_m \geq 7,5$  МПа;  $f_b=7,5$  МПа і  $f_m \geq 5$  МПа;  $f_b=5$  МПа,  $f_m \geq 2,5$  МПа.

5. Уточнена область реалізації зсуву в бетоні в умовах плоского напруженого стану: верхня границя знаходиться в області нерівномірного стиснення (максимальне значення дотичних напружень при  $f_{ct} / f_c = 0,1$  складає  $\tau_n = 0,55 f_c$  за кута  $\psi = 0^\circ$ ); нижня межа – в області змішаних напружених станів.

Для її визначення введено поняття міри пластичності  $\mu_{pl}$  як відношення висоти стиснутої зони в граничній стадії до її висоти на пружній стадії роботи коротких елементів з мінімальним впливом згинального моменту, котре звужує інтервал площин ковзання. Нижній границі відповідають нормальні напруження  $\sigma_2 = \mu_{pl} \left( f_{ct} + 2\sqrt{(f_c^2 - f_c f_{ct} + f_{ct}^2)/3} - f_c \right)$ . (при  $f_{ct} / f_c = 0,1$  рівень напружень  $\sigma_1 / f_c = 0,9$ ,  $\sigma_2 / f_c = -0,05$ ,  $\sigma_n / f_c = 0,27$ ,  $\tau_n / f_c = 0,45$ , кут  $\psi = 19^\circ 28'$ ).

6. Визначено опір бетонних елементів і кам'яної кладки з використанням умови мінімуму потужності локалізованої пластичної деформації при плоскому напруженому стані та плоскій деформації з розробленням кінематичних схем руйнування елементів за: осьового стиску, сумісної дії вертикальної  $N$  та горизонтальної  $T$  сил для елементів з постійним і змінним за висотою поперечним перерізом та місцевого стиснення. У результаті розрахунків встановлено:

- при осьовому стиску бетонних призм і кам'яних стовпів реалізується зсув як за цілим перерізом в одній площині, так і за двома площинами у стиснутих зонах у разі наявності вертикальної тріщини в середній частині елемента;
- підвищення опору симетричного бетонного (кам'яного) клину при збільшенні його кута від  $15^\circ$  до  $30^\circ$  на 25%;
- зниження опору бетонної пластинки за сумісної дії на торцях  $N$  і  $T$  на 22% при збільшенні кута рівнодійної навантаження  $\arctan(T / N)$  на  $15^\circ$ ;
- випадки руйнування усічених бетонних несиметричних клинів за перерізами, що проходять від кута клину (випадок 1) та від прямого кута (випадок 2): в разі спрямування горизонтальної сили від прямого кута зі збільшенням  $T / N$  у випадку 1 опір підвищується, у випадку 2 – знижується;
- граничний опір кам'яної кладки при зсуві за цілим перерізом;
- при дії місцевого навантаження межу реалізації випадків руйнування тільки в стиснутій зоні й одночасного руйнування в стиснутій та розтягнутій зонах за відношенням висоти елемента до ширини штампа;

- вплив армування, котре розглядається як обтиснення у напрямку розміщення арматури, відповідно до її інтенсивності.

7. На основі принципу максимуму прирощень напружень при деформуванні встановлена величина граничної відносної деформації  $\varepsilon_{cR}(\varepsilon_{mR})$  на діаграмі «напруження - деформація» бетону (кам'яної кладки) при стиску, яка відповідає максимальному деформуванню без «макродеструктуризації». Підвищення навантаження має місце лише за умови не перевищення відносною деформацією стиснутого бетону (кам'яної кладки) граничних значень. Визначена величина  $\varepsilon_{cR}$  складає для бетону класу міцності С8/10  $\varepsilon_{cR,cd}=2,99\%$  при коефіцієнті повноти епюри  $\omega_R=0,828$ , за класу С30/35  $\varepsilon_{cR,cd}=2,63\%$ ,  $\omega_R=0,786$ , при С50/60  $\varepsilon_{cR,cd}=2,59\%$ ,  $\omega_R=0,748$ . Запропоновано оперувати рівнем граничної відносної деформації  $\eta_R$ , який встановлюється на залежності  $\sigma_c / f_{cd} - \eta$  ( $\sigma_m / f_d - \eta$ ), описаній дробово-раціональною функцією або гармонізованим поліномом 5-го степеня, визначеним із умови:  $\frac{\sigma_c}{f_{cd}} \eta_R \left( \frac{\sigma_m}{f_d} \eta_R \right)_c = \max \frac{\sigma_c}{f_{cd}} \eta \left( \frac{\sigma_m}{f_d} \eta \right)$  і дорівнює для бетону класу С8/10  $\eta_R = 1,92$ , при С30/35  $\eta_R = 1,53$ , за С50/60  $\eta_R = 1,36$ , для цегляної кладки  $\eta_R = 1,63$ ,  $\omega_R = 0,8$ .

8. Для уникнення переоцінювання несучої здатності за нормальними перерізами конструкцій, що згинаються, запропоновано виконувати перевірку умови  $\eta_u \leq \eta_R$ , де рівень відносної деформації  $\eta_u$  відповідає досягненню напруженнями в арматурі міцності на розтяг. У разі  $\eta_u > \eta_R$  відбувається руйнування бетону (кам'яної кладки) стиснутої зони. При армуванні балкових залізобетонних конструкцій високоміцною поздовжньою арматурою та використанні верхньої висхідної гілки її деформування в розрахунках пропонується розглядати рівень граничної відносної деформації  $\eta_R$ , як і для переармованих залізобетонних і армокам'яних конструкцій.

9. Визначена несуча здатність з використанням умови мінімуму деформування та врахуванням специфіки напружено-деформованого стану:

- балкових залізобетонних конструкцій за похилими перерізами на дію поперечної сили;
- коротких залізобетонних консолей;
- опорних ділянок за місцевого стиску;
- кам'яних стін на сумісну дію горизонтального (сейсмічного) та вертикального навантаження.

Розроблені інженерні методи оцінювання їх несучої здатності.

10. Достовірність запропонованих методів підтверджена порівнянням отриманих теоретичних результатів з експериментальними на 186-ти зразках, засвідчена їх збіжність. За уточненими розрахунковими схемами та залежностями порівняно з нормами враховано вплив додаткових факторів.

Встановлено:

- використання верхньої висхідної гілки деформування арматури в розрахунках армованих високоміцною арматурою балкових залізобетонних конструкцій за нормальними перерізами дозволяє уникнути недооцінювання

несучої здатності, що має місце при застосуванні горизонтальної гілки (для арматури А1000 до 8,6 %);

- врахування роботи бетону над похилою тріщиною підвищує величину поперечної сили  $V_{Rd}$  і дозволяє знизити інтенсивність поперечного армування при бетоні класу С25/30 і арматурі А400С за  $\cot\theta = 1,75$  на 50% і  $\cot\theta = 2$  на 30%;

- величина  $\frac{V_{Rd}}{bdf_{cd}}$  для залізобетонних консолей змінюється від 0,18 до 0,33

залежно від місця прикладання та довжини площадки навантаження, що не враховується нормами і приводить як до переоцінювання, так і недооцінювання несучої здатності;

- підвищення несучої здатності при місцевому стиску порівняно з визначеною згідно норм за відношення розрахункової (ефективної) площі до навантаженої  $A_{c1} / A_{c0} = 2,5$  на 25 % і при  $A_{c1} / A_{c0} (A_{ef} / A_b) = 4$  на 33 % для бетонних опор та на 14 % для кам'яних конструкцій.

11. Удосконалені конструктивні рішення 15-ти метрової збірної залізобетонної балки (витрати високоміцної арматури знижені на 9,1 %), монолітних ригелів перекриттів (інтенсивність армування зменшена на 20 %) та цегляних простінків (надані пропозиції щодо розмірів простінків і площадки спирання перемичок при сейсмічному впливі). Визначено залишковий ресурс за нормальними перерізами переармованих ригелів трибуни стадіону та при місцевому стиску фундаментів під технологічне обладнання для обґрунтованого відновлення їх експлуатаційної придатності.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Публікації, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації*

Монографії:

1. Погрібний В.В. Методологія розрахунку несучої здатності залізобетонних і кам'яних конструкцій з використанням умов екстремуму деформування: монографія / В.В. Погрібний. – Полтава: ПП «Астрая», 2022. – 388 с.
2. Довженко О.О. Каркаси багатопверхових будівель із збірно-монолітними балковими перекриттями : монографія / О.О. Довженко, В.В. Погрібний. – Полтава: ПолтНТУ, 2016. – 196 с. *(аналіз сучасних конструктивних рішень несучих елементів перекриттів, приведені шляхи удосконалення конструкцій)*  
Статті у наукових періодичних виданнях іноземних держав/  
або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних  
Scopus та/або Web of Science Core Collections:
3. Pohribnyi V. The design of concrete elements strength under local compression based on the variational method in the plasticity theory / V. Pohribnyi, O. Dovzhenko, L. Karabash, I. Usenko // MATEC Web of Conf. – 2017. – Vol. 116, 02026. (Scopus, Web of Science Core Collection) *(аналіз залежностей для розрахунку граничного опору бетону при місцевому стиску в умовах плоского напруженого стану, установлені визначальні фактори впливу)*

4. Dovzhenko O. Bearing capacity calculation of reinforced concrete corbels under the shear action / O. Dovzhenko, V. Pohribnyi, V. Pents, D. Mariukha // MATEC Web Conf. – 2018. – Vol. 230, 02005. (Scopus) *(розроблені розрахункові схеми коротких залізобетонних консолей, визначена несуча здатність)*
5. Dovzhenko O.O. Concrete and reinforced concrete strength under action of shear, crushing and punching shear / O.O. Dovzhenko, V.V. Pohribnyi, I.A. Yurko // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 463, 022026. (Scopus) *(розглянуті розрахункові схеми бетонних елементів при стиску за умови локалізації пластичної деформації в тонких шарах)*
6. Dovzhenko O. Shear failure form realization in concrete / O. Dovzhenko, V. Pogrebnyi, I. Yurko // News the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. – 2018. – Vol. 2 (428). – Pp. 55–62 (Scopus, Web of Science Core Collection) *(запропонована умова пластичності бетону)*
7. Dovzhenko O. Strength design method of reinforced concrete beam elements along an inclined crack on the joint action of transverse forces and bending moments / O. Dovzhenko, V. Pohribnyi, O. Shkurupiy, P. Mytrofanov // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – 7 (4.8). – Pp. 196–202. *(запропонована методика дослідження усічених клинів як моделей стиснутої зони бетону над похилою тріщиною)*
8. Pohribnyi V. The ideal plasticity theory usage peculiarities to concrete and reinforced concrete / V. Pohribnyi, O. Dovzhenko, O. Maliovana // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – 7 (3.2). – Pp. 19–26. (Scopus) *(отримані кінематичні схеми руйнування та залежності для визначення опору бетонних елементів за різних напружено-деформованих станів)*
9. Pohribnyi V. The improved technique for calculating the concrete elements strength under local compression / V. Pohribnyi, O. Dovzhenko, I. Kuznietsova, D. Usenko // MATEC Web Conf. – 2018. – Vol. 230, 02025. (Scopus) *(аналіз залежностей для розрахунку граничного опору бетону при місцевому стисненні в умовах об'ємного напруженого стану, визначені фактори впливу)*
10. Dovzhenko O. Strength calculation of risers near the supports of reinforced concrete three-hinged frames based on the concrete plasticity theory / O. Dovzhenko, V. Pohribnyi, Ye. Klymenko, M. Oreškovič, O. Maliovana // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 708, 012046. (Scopus) *(розрахунок опору стояків біля опор залізобетонних рам на основі теорії пластичності бетону)*
11. Dovzhenko O.O. On clarification of the application area of the concrete plasticity theory to the strength problems solutions / O.O. Dovzhenko, V.V. Pohribnyi, V.F. Pents, M.V. Pents // In: Onyshchenko V., Mammadova G., Sivitska S., Gasimov A. (eds) Proceedings of the 2nd International Conference on Building Innovations. Lecture Notes in Civil Engineering. – Springer, Cham. – 2020. – Vol. 73. – Pp. 25–33. (Scopus) *(отримані розрахункові залежності для визначення опору бетонних елементів при центральному та місцевому стиску, зрізі клинів, встановлена міра пластичності бетону)*

12. Dovzhenko O. Use of extreme properties of deformation for estimation of strength of constructive concrete and reinforced concrete / O. Dovzhenko, V. Pohribnyi, Ye. Klymenko, M. Oreškovič // News the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. – 2020. – Vol. 3 (441). – Pp. 32–39. (Scopus, Web of Science Core Collection) *(встановлена точка граничної деформації на діаграмі «напруження-деформація» стиску бетону на межі максимуму деформування без «макродеструктуризації»)*
13. Dovzhenko O. Discontinuous solutions of concrete elements strength problems using the principle of virtual velocities / O. Dovzhenko, V. Pohribnyi, V. Kyrychenko, O. Malovana // In: Onyshchenko V., Mammadova G., Sivitska S., Gasimov A. (eds) Proceedings of the 3rd International Conference on Building Innovations. ICBI 2020. Lecture Notes in Civil Engineering. – Springer, Cham. – 2022. – Vol. 181. – Pp. 59–71. (Scopus) *(обґрунтовані переваги розривних рішень задач опору бетонних елементів)*
14. Kuznietsova I. Influence of the sizes and the loading platform form on the strength of concrete elements at local compression. / I. Kuznietsova, O. Dovzhenko, V. Pohribnyi, I. Usenko // Proc. of the 2020 session of the 13th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, held in Paris, France, August 26-28, 2020. – Pp. 63–69. (Scopus) *(встановлені визначальні фактори впливу на опір бетонної опори при різних розмірах площадки передачі навантаження)*
15. Usenko D. Masonry strengthening under the combined action of vertical and horizontal forces / D. Usenko, O. Dovzhenko, V. Pohribnyi, O. Zyma // Proc. of the 2020 session of the 13th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, held in Paris, France, August 26-28, 2020. – Pp. 193–199. (Scopus) *(розроблена кінематична схема при діагональному розколюванні, визначені розрахункові параметри в найбільш напруженій області)*
16. Pohribnyi V. Plasticity theory in strength calculations concrete elements under local compression / V. Pohribnyi, O. Dovzhenko, O. Fenko, D. Usenko // In: Onyshchenko V., Mammadova G., Sivitska S., Gasimov A. (eds) Proceedings of the 3rd International Conference on Building Innovations. ICBI 2020. Lecture Notes in Civil Engineering. – Springer, Cham. – 2022. – Vol. 181. – Pp. 343–353. (Scopus) *(отримані розривні рішення задач опору бетонних елементів при місцевій дії навантаження в умовах плоского напруженого стану та плоскої деформації)*
17. Dovzhenko O. Accident prevention of buildings and structures based on two-level assessment of bearing capacity of structures / O. Dovzhenko, V. Pohribnyi, Ye. Klymenko, O. Fenko // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2684, 030009. (Scopus) *(для уточнення технічного стану конструкцій запропоновано двоетапне визначення несучої здатності та послідовність виведення конструкцій із аварійного стану)*
18. Pohribnyi V. Concrete and reinforced concrete shear: An improved strength calculation method / V. Pohribnyi, O. Dovzhenko, Y. Klymenko, O. Fenko // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2678, 020014. (Scopus) *(на єдиній основі розв'язані задачі опору та несучої здатності бетонних і залізобетонних елементів та конструкцій при деформації зсуву)*

Статті у наукових фахових виданнях України:

19. Погрібний В.В. Напружено-деформований стан і граничне навантаження шпонкових з'єднань залізобетонних конструкцій / В.В. Погрібний, О.О. Довженко // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. – К.: Техніка, 2002. – Вип. 39. – С. 23–28. *(виявлені особливості деформованого стану бетону в зоні руйнування для одно, трьох і п'ятишпонкових з'єднань)*
20. Клименко Є.В. Деформований та технічний стан несучих конструкцій стадіону «Ворскла» в м. Полтаві / Є.В. Клименко, В.В. Погрібний, О.О. Довженко // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. – К.: Техніка, 2004. – Вип. 55. – С. 319–324. *(проведені натурні експериментальні дослідження залізобетонних ригелів трибуни стадіону, визначені деформований стан та залишкова несуча здатність ригелів)*
21. Довженко О.О. Дослідження опору бетону зрізові на зразках Е. Мерша / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, Т.Ю. Качан // Зб. наук. пр. (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава, 2010. – Вип. 2. – С. 31–38. *(оброблені результати випробування коротких балок, порівняні теоретичні та експериментальні величини граничного опору)*
22. Довженко О.О. Міцність залізобетонних шпонок при двоярусному розташуванні арматури / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, Л.В. Карабаш, М.О. Музичук // Зб. наук. пр. (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава, 2011. – Вип. 1. – С. 80–86. *(встановлено деформований стан бетону в зоні зсуву при двоярусному розташуванні арматури)*
23. Довженко О.О. Теоретичне дослідження міцності на зріз бетонних балок-стінок за допомогою варіаційного методу в теорії пластичності бетону / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, К.І. Залужна, Т.Ю. Качан // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. 4 (69). – С. 120–123. *(наведено результати дослідження опору бетонних балок-стінок, запропоновано розрахунок за варіаційним методом)*
24. Довженко О.О. До питання визначення межі реалізації зсувної форми руйнування бетонних елементів / О.О. Довженко, В.В. Погрібний // Вісник ОДАБА: Зб. наук. праць. – Одеса, 2012. – Вип. 47. – Ч.1. – С. 89–95. *(визначена межа реалізації зсуву бетону при плоскому напруженому стані)*
25. Довженко О.О. Про можливість застосування теорії пластичності до розрахунку міцності елементів із високоміцного бетону / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, О.О. Куриленко // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. – К.: Техніка, 2012. – Вип. 105. – С. 74–82. *(здійснено порівняльний аналіз теоретичного опору бетонних зразків із високоміцного бетону (призм, усічених клинів) з дослідною)*
26. Довженко О.О. Збірно-монолітна конструктивна система «КУБ-2,5» під соціальне житло в Україні: з'єднання колони з перекриттям / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, А.Г. Гриценко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. пр. – Рівне: УДУВГП, 2013. – Вип. 27. – С. 301–309. *(проаналізовано конструктивне рішення стикового з'єднання колон між собою)*

27. Довженко О.О. Методика експериментальних досліджень стиків залізобетонних елементів із змінною кількістю шпонок / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, Ю.В. Чурса // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : Зб. наук. пр. – Рівне: УДУВГП, 2013. – Вип. 27. – С. 87–96. *(складена програма експериментальних досліджень стиків за різної кількості шпонок для визначення особливості їх деформованого стану)*
28. Довженко О.О. Методика розрахунку стикових з'єднань збірно-монолітних конструктивних систем під доступне житло в Україні / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, Л.В. Карабаш, А.О. Бігдан, Н.В. Дакало // Зб. наук. пр. (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава, 2013. – Вип. 4 (1). – С. 94–105. *(проаналізовані збірно-монолітні конструктивні системи будівель, розглянуті з'єднання елементів, намічені шляхи їх вдосконалення)*
29. Довженко О.О. Результати експериментальних досліджень шпонкових з'єднань: вплив ширини шва та кількості шпонок на міцність стиків / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, Ю.В. Чурса, Г.А. Кошман // Будівельні конструкції: Збірник наук. пр. – К.: Будівельник, 2013. – Вип. 79. – С. 370–379. *(експериментально виявлено вплив ширини шва на деформований стан з'єднань)*
30. Довженко О.О. Результати експериментальних досліджень шпонкових з'єднань: характер тріщиноутворення, міцність бетонних і залізобетонних шпонок / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, Ю.В. Чурса // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. пр. – Рівне: УДУВГП, 2013. – Вип. 25. – С. 276–286. *(виявлено характер руйнування та його наближення до кінематичних можливих розрахункових схем)*
31. Довженко О.О. Результати експериментальних досліджень залізобетонних елементів із змінною кількістю шпонок / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, Ю.В. Чурса // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. пр. – Рівне: УДУВГП, 2014. – Вип. 29. – С. 143–150. *(визначено особливість деформованого стану при зміні кількості шпонок)*
32. Довженко О.О. До питання оцінювання несучої здатності залізобетонних елементів за похилими перерізами / О.О. Довженко, В.В. Погрібний // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. пр. – Рівне, 2015. – Вип. 31. – С. 434–440. *(запропонована методика оцінювання несучої здатності залізобетонних елементів за похилими перерізами, представлені розрахункові залежності)*
33. Довженко О.О. Про міру пластичності бетону / О.О. Довженко, В.В. Погрібний // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. пр. – Рівне: УДУВГП, 2015. – Вип. 30. – С. 13–18. *(запропоновано визначати міру пластичності бетону як відношення висоти стиснутої зони на стадії руйнування до її висоти на пружній стадії роботи коротких елементів)*
34. Довженко О.О. Розрахунок несучої здатності залізобетонних елементів на дію поперечної сили за похилою стиснутою смугою / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, Ю.В. Чурса // Сучасні технології та методи розрахунку в



- будівництві: Зб. наук, пр. – Луцьк: ЛНТУ, 2015. – Вип. 3. – С. 66–73. *(запропоновані розрахункові схеми для визначення опору в межах похилої смуги з врахуванням особливості напружено-деформованого стану)*
35. Довженко О.О. Вертикальні стики панельних будівель: конструктивні рішення, розрахунок за міцністю / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, Є. І. Чумак // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2016. – Вип. 33. – С. 237–243. *(проаналізовані конструктивні рішення вертикальних стиків стінових панелей та їх розрахункові схеми)*
  36. Довженко О.О. До питання оцінювання технічного стану залізобетонних балок покриття виробничих будівель за несучою здатністю / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, Д.В. Усенко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. – Рівне: НУВГтаП, 2016. – Вип. 32. – С. 155–160. *(оцінювання залишкового ресурсу за умови екстремуму деформування бетону стиснутої зони)*
  37. Довженко О. О. Оцінювання опору при зрізі бетонних елементів на основі теорії пластичності бетону / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, О.О. Мальована // Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – Харків: УДУЗТ, 2016. – Вип. 165. – С. 205–215. *(запропоновано загальний підхід до розв'язання задач опору з використанням умови мінімуму потужності деформування)*
  38. Погрібний В. В. Гармонізація полінома 5-го ступеня для опису діаграм «напруження-деформації» бетону / В.В. Погрібний, О.О. Довженко, І. В. Шостак // Вісник ОДАБА: Зб. наук. пр. – Одеса: ОДАБА, 2016. – Вип. 65. – С. 62–68. *(поліном 5-го степеня гармонізовано до дробово-раціональної функції для спрощення визначення розрахункових параметрів)*
  39. Довженко О.О. Зріз як форма руйнування бетону / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, І.А. Юрко // Наука та будівництво. – 2017. – №4 (14). – С. 43–50. *(приведені випадки руйнування при центральному стиску та сумісній дії вертикальної та горизонтальної сил)*
  40. Довженко О.О. Перспективи застосування технології збірно-монолітного каркасу в багатоповерховому будівництві України / О. О. Довженко, В.В. Погрібний, І.В. Шостак // Нові технології в будівництві. – № 32. – 2017. – С. 79–85. *(вказані переваги технології збірно-монолітного каркасу як елемента несучої системи і шляхи удосконалення конструктивних рішень)*
  41. Довженко О. О. До питання оцінювання технічного стану залізобетонних конструкцій, що згинаються / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, В. Г. Кобилецький, Т. О. Совенко // Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – Харків: УкрДУЗТ, 2019. – Вип. 184. – С. 44–51. *(визначені додаткові фактори, що впливають на несучу здатність балкових конструкцій)*
  42. Dovzhenko O. Improved calculation method of reinforced concrete elements strength on inclined sections / O. Dovzhenko, V. Pohribnyi, O. Maliovana, L. Karabash // Зб. наук. пр. (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава, 2019. – Вип. 52'. – С. 75–81. *(удосконалення методики розрахунку опору похилих перерізів у масивних залізобетонних елементах)*

43. Dovzhenko O. Work of masonry under the combined action of vertical and horizontal loads: an analysis of experimental studies / O. Dovzhenko, V. Pohribnyi, D. Usenko, M. Qiniso // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава, 2020. – Вип. 2(55)' – Рр. 44–51. *(описана робота кам'яної кладки при сумісній дії вертикальних і горизонтальних навантажень: аналіз експериментальних досліджень)*
44. Довженко О.О. Методика розрахунку міцності у похилих перерізах балкових залізобетонних елементів / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, О.О. Мальована, О.М. Шитова // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наукових праць. – Рівне: НУВГП, 2021. – Вип. 40. – С. 129–136. *(розроблена методика розрахунку опору залізобетонних елементів, перевірена даними експериментів)*
45. Dovzhenko O. The masonry calculation strength under the vertical and horizontal loads combined action by the variational method in the plasticity theory / O. Dovzhenko, V. Pohribnyi, V. Usenko, D. Usenko // Зб. наук. пр. (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава, 2021. – Вип. 2 (57)' – Рр. 26–31. *(розрахунок опору кладки на дію вертикальних і горизонтальних сил)*
46. Кузнєцова І.Г. Міцність бетону при місцевому стисненні з урахуванням відношення висоти елемента до розміру площадки навантаження / І.Г. Кузнєцова, О.О. Довженко, В.В. Погрібний // Український журнал будівництва та архітектури. – 2021. – № 5 (005). – С. 61–67. *(визначена несуча здатність опорних ділянок на місцеву дію навантаження)*
47. Погрібний В. До визначення міцності кам'яної кладки при стисненні / В. Погрібний, О. Довженко, Д. Усенко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. – Рівне: УДУВГП, 2022. – Вип. 41. – С. 200–207. *(висвітлена неоднозначність вибору дослідних зразків кам'яної кладки при випробуванні на центральний стиск)*
- Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:
48. Довженко О.О. Вплив згинального моменту на міцність шпонок / О.О. Довженко, В.В. Погрібний // «Вопросы. Ответы. Гипотезы: наука XXI век»: Сб. научн. док. – Гданськ, 2014. – Ч. 1. – С. 11–16. *(встановлено вплив згинального моменту на опір коротких бетонних елементів)*
49. Погрібний В.В. Характеристика зрізу як форми руйнування / В. В. Погрібний, О. О. Довженко // Modern scientific researches and developments: theoretical value and practical results – 2016: materials of international scientific and practical conference. – Bratislava, 2016. – Рр. 111–112. *(наведені ознаки реалізації зсуву)*
50. Довженко О.О. Методика розрахунку міцності залізобетонних балкових елементів за похилою тріщиною на сумісну дію поперечних сил та згинальних моментів / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, О.А. Шкурупій, П.Б. Митрофанов // Збірник наукових праць I Міжнародної науково-практичної конференції «TECHNOLOGY, ENGINEERING AND SCIENCE – 2018» 24 – 25 жовтня 2018 року. – Лондон: ПолтНТУ, 2018. – С. 33–34. *(викладена суть вдосконалення методики розрахунку залізобетонних балкових елементів на сумісну дію поперечних сил та згинальних моментів)*

51. Довженко О.О. Стики несучих елементів сучасних конструктивних систем цивільних будівель / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, І.А. Юрко // «ҚазҚСҒЗИ» АҚ хабаршысы, за матеріалами міжнародної науково-практичної конференції «Жаңа құрылыс тенденциялары 21 ғасырда». – 2017. – № 7(71). – С. 5–10. *(висвітлено шляхи вдосконалення з'єднань несучих елементів конструктивних систем із залізобетону)*
52. Довженко О.О. Розрахунок міцності стояків залізобетонних тришарнірних рам біля опор при зрізі на основі теорії пластичності / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, О.О. Мальована, Л.В. Карабаш // Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті, 8 - ма міжнародна науково-практична конференція 20 – 22 листопада 2019 р., м. Харків: тези доповідей. Ч.2. – Харків: УкрДУЗТ, 2019. – С. 59–60. *(надана методика розрахунку опору стояків тришарнірних рам)*
53. Довженко О.О. Теорія пластичності в розрахунках міцності бетонних і кам'яних елементів при місцевому стисненні / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, І.Г. Кузнецова, Д.В. Усенко // Збірник наукових праць за матеріалами II Міжнародної українсько-азербайджанської конференції «BUILDING INNOVATIONS – 2019», 23 – 24 травня 2019 року. – Полтава: ПолтНТУ, 2019. – С. 78–80. *(висвітлені загальні положення розрахунку опору бетонних і кам'яних елементів на місцеву дію навантаження)*
54. Погрібний В.В. Міцність елементів із високоміцного бетону при зрізі / В.В. Погрібний, О.О. Довженко, О.О. Мальована // Збірник наукових праць XII Міжнародної науково-практичної конференції «Академічна й університетська наука: результати та перспективи», 6 грудня 2019 р. – Полтава: Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2019. – С. 295–298. *(окреслена перспектива застосування теорії пластичності при розрахунках опору елементів із високоміцного бетону)*
55. Довженко О.О. Розрахунок підсиленої цегляної кладки при сумісній дії вертикальних і горизонтальних сил / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, Д.В. Усенко // Ефективні технології в будівництві: програма та тези доповідей У Міжнародної науково-технічної конференції (19 листопада 2020 р., м. Київ). – К.: Видавництво Ліра-К., 2020. – С. 148–149. *(визначено опір кладки при сумісній дії горизонтального та вертикального навантаження)*
56. Довженко О.О. Шляхи підвищення енергоефективності конструктивних рішень вузлів з'єднань елементів несучих систем об'єктів транспорту / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, Т.О. Совенко // Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції «Енергоефективність на транспорті», 18 – 20 листопада 2020, Харків: УкрДУЗД. – С.71–72. *(визначені напрямки підвищення енергоефективності вузлів з'єднань несучих конструкцій)*
57. Довженко О.О. Виведення несучих конструкцій будівель і споруд із аварійного стану // О.О. Довженко, В.В. Погрібний О.М. Шитова // Тези доповідей IV Міжнародної конференції «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд» (9 – 11 вересня 2021, м. Одеса). – Одеса: ОДАБА. – 2021.

- С. 50. *(надані пропозиції щодо послідовності виведення несучих конструкцій будівель із аварійного стану на основі оцінювання залишкової несучої здатності)*
58. Довженко О.О. Метод розрахунку міцності у похилому перерізі залізобетонних конструкцій, що згинаються / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, О.О. Мальована, Т.О. Совенко // Збірник наукових праць за матеріалами IV Міжнародної українсько-азербайджанської науково-практичної конференції (20 – 21 травня 2021 року). – Полтава – Баку: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Азербайджанський архітектурно-будівельний університет, 2021. – С. 125–126. *(наведені основні положення розрахунку несучої здатності залізобетонних конструкцій, що згинаються, за похилими перерізами)*
59. Довженко О.О. Опір залізобетону при зрізі / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, О.О. Мальована, Т.О. Совенко // Збірник наукових праць за матеріалами IV Міжнародної українсько-азербайджанської науково-практичної конференції (20 – 21 травня 2021 року). – Полтава – Баку, 2021. – С. 127–128. *(викладені основи визначення опору залізобетону при деформації зсуву)*
60. Довженко О.О. Попередження аварій будівель і споруд на основі дворівневої оцінки несучої здатності конструкцій / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, Є.В. Клименко, О.Г. Фенко // Тези доповідей 9-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті». – Харків, УкрДУЗТ, 2021. – С. 115–116. *(наведені рекомендації щодо попередження аварій будівель і споруд)*
61. Погрібний В.В. Дворівнева оцінка несучої здатності для визначення технічного стану будівельних конструкцій / В.В. Погрібний, О.О. Довженко, О.М. Шитова // Збірник наукових праць XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Академічна й університетська наука: результати та перспективи», 09 грудня 2021 року. – Полтава: Полтавська політехніка 2021. – С. 338–341. *(запропонована дворівнева оцінка несучої здатності будівельних конструкцій)*
62. Погрібний В. Зріз бетону та залізобетону: удосконалена методика розрахунку міцності / В. Погрібний, О. Довженко, Є. Клименко, О. Фенко // Тези XIX Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні технології у будівництві, цивільній інженерії та архітектурі» (м. Чернігів, 19 – 22 вересня 2021 р.). – С. 249–250. *(наведена удосконалена методика розрахунку міцності та опору бетонних і залізобетонних елементів при деформаціях зсуву)*
63. Погрібний В.В. Критерій та області реалізації зрізу в бетоні / В.В. Погрібний, О.О. Довженко, О.М. Шитова // Збірник наукових праць за матеріалами IV Міжнародної українсько-азербайджанської науково-практичної конференції (20 – 21 травня 2021 року). – Полтава – Баку, 2021. – С. 162–163. *(визначені області реалізації зсуву в бетоні)*

64. Погрібний В.В. Міцність кам'яної кладки при осьовому стисненні / В. В. Погрібний, О.О. Довженко, Д.В. Усенко // Комплексні композитні конструкції будівель та споруд в умовах воєнного стану (CSCS-2022): Зб. наук. пр. за матеріалами XIV Міжнародної науково-технічної конференції (20 – 22 червня 2022 року). – Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка, 2022. – С. 102–104. *(наведені випадки руйнування кам'яної кладки при осьовому стиску)*
65. Погрібний В.В. Опір бетонного клину при зрізі над небезпечною похилою тріщиною залізобетонних конструкцій/ В.В. Погрібний, В.Л. Швайковський // Комплексні композитні конструкції будівель та споруд в умовах воєнного стану (CSCS-2022): Зб. наук. пр. за матеріалами XIV Міжнародної науково-технічної конференції (20 – 22 червня 2022 року). – Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка, 2022. – С. 105–108. *(встановлено вплив на опір бетонної клиноподібної зони кутів клину та напрямку дії рівнодійного зусилля на його усічену грань)*
66. Погрібний В.В. Методи розрахунку несучої здатності залізобетонних і кам'яних конструкцій з використанням умов екстремуму деформування / В.В. Погрібний // Тези 75-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». Том 1. (Полтава, 02 травня – 25 травня 2023 року) – Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2023. – С. 135–136.
67. Погрібний В. Методика розрахунку несучої здатності залізобетонних балкових конструкцій за похилими перерізами на основі «фермової аналогії» та «дискової моделі» / В. Погрібний, В. Швайковський // Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної on-line конференції «Проблеми будівельного та транспортного комплексів». – Кропивницький: ЦНТУ 2023. – С. 118–121. *(встановлено вплив на опір бетонної клиноподібної зони кутів клину та напрямку дії рівнодійного зусилля на його усічену грань)*
68. Погрібний В. Розрахунок несучої здатності коротких залізобетонних консолей / В. Погрібний, М. Мищенко // Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної on-line конференції «Проблеми будівельного та транспортного комплексів». – Кропивницький: ЦНТУ 2023 – С. 122–123. *(надана розрахункова схема коротких консолей, врахована робота бетону в межах похилої смуги)*
69. Швайковський В.В. Розрахунок опору залізобетонних елементів за похилими перерізами на дію поперечної сили / В.Л. Швайковський, В.В. Погрібний // Тези 75-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». Том 1. (Полтава, 02 травня – 25 травня 2023 року) – Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2023. – С. 137–138. *(викладена суть розрахунку несучої здатності залізобетонних елементів за похилими перерізами)*

*Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації*

Патенти:

70. Патент 62865/ Україна, (51)МПК (2011.01) G01N 3/00. Спосіб дослідження міцності бетону стиснутої зони над небезпечною похилою тріщиною в згинальних елементах / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, Т.Ю. Качан; заявник та власник Полтава. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. – № u201011002 ; заявл. 13.09.2010 ; опубл. 26.09.11, Бюл. № 18. *(запропоновано спосіб дослідження бетону стиснутої зони над небезпечною похилою тріщиною на моделях усічених клинів)*
71. Патент 95177/ Україна, МПК 2016.01 E04B 1/00. Вузол з'єднання надколонної плити з колоною у збірно-монолітних безкапітельно-безбалкових перекриттях/ О.О. Довженко, В.В. Погрібний, Ю.В. Чурса, А.О. Бігдан; заявник та власник Полтав. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. – № и 2014 07594 ; заявл. 07.07.2014 ; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 23. *(удосконалено вузол з'єднання колон між собою, що підвищує несучу здатність на стадії монтажу та експлуатаційну придатність)*
72. Патент 140820. Україна МПК (2020.01) E04B 1/00. Вузол з'єднання залізобетонних плит з ригелем у збірно-монолітних перекриттях з подвійним функціональним призначенням робочої арматури / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, Ю.В. Чурса, К.С. Костроміцька; заявник та власник Полтав. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. – № u 2020 09018; заявл. 29.07.2019, опубл. 10.03.2020, Бюл. № 5. *(ідея використання поздовжньої арматури шпонки в якості поперечної арматури ригеля)*

Колективні монографії:

73. Dovzhenko O. Improvement of the affordable housing precast and precast-cast-in place building production technologies: Collective Monograph / O. Dovzhenko, V. Pohribnyi, O. Zyma // Modern world tendencies in the development of science. – Vol. 1. – London, 2019. – Pp. 13–25. *(визначені шляхи вдосконалення технологій виробництва збірних і збірно-монолітних будівель)*
74. Довженко О.О. Міцність цегляної кладки при діагональному розколюванні / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, Д.В. Усенко // Findings of modern engineering research and developments: Scientific monograph. Riga, Latvia: «Baltija Publishing», 2022. – Pp. 41–63 *(розглянуто випадок втрати несучої здатності простінки при сумісній дії на цегляну кладку горизонтальної (сейсмічної) та вертикальної сил за діагонального розколювання)*
75. Соловйов В. В. Відновлення експлуатаційної придатності кам'яної кладки, пошкодженої в умовах надзвичайних ситуацій / В.В. Соловйов, О.О. Довженко В.В. Погрібний, Д.В. Усенко // Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022: колективна монографія. – Полтава – Львів: НУПП імені Юрія Кондратюка, НУ «Львівська політехніка» – Дніпро: Середняк Т. К., 2022. – С. 485–498. *(розглянуті питання визначення залишкової несучої здатності, пошкоджених цегляних стін, що експлуатуються в умовах надзвичайних ситуацій)*

## АНОТАЦІЯ

*Погрібний В.В.* Методологія оцінювання несучої здатності залізобетонних і кам'яних конструкцій з використанням умов екстремуму деформування. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» (19–«Архітектура та будівництво»). – Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, 2024.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної проблеми оцінювання несучої здатності залізобетонних і кам'яних конструкцій з використанням умов екстремуму деформування.

Математичний апарат теорії пластичності адаптовано до бетону та кам'яної кладки. При домінуванні деформації зсуву застосовуються розривні рішення та принцип віртуальних швидкостей. Пластична деформація локалізується у тонких шарах на поверхні руйнування, сусідні області вважаються жорсткими. Величина граничного зусилля відповідає мінімуму потужності пластичної деформації. Розв'язані задачі опору бетонних і кам'яних елементів при центральному та місцевому стиску та сумісній дії вертикальних і горизонтальних сил. Визначена несуча здатність балкових залізобетонних конструкцій за похилими перерізами, коротких консолей, бетонних і кам'яних опор при місцевому стиску, цегляних простінків при сейсмічних впливах.

Для уникнення втрати несучої здатності за нормальними перерізами конструкцій, що згинаються, при руйнуванні бетону чи кам'яної кладки стиснутої зони встановлені значення їх граничної відносної деформації, котра відповідає максимуму деформування без «макродеструктуризації». Визначено несучу здатність за нормальними перерізами армованих високоміцною поздовжньою арматурою залізобетонних конструкцій та залишковий ресурс переармованих поздовжньою арматурою залізобетонних і армокам'яних балок.

Розроблені інженерні методи розрахунку несучої здатності конструкцій, удосконалені їх конструктивні рішення.

**Ключові слова:** опір, несуча здатність, екстремальні принципи, теорія пластичності, розривні рішення, залізобетонні та кам'яні конструкції, деформація.

## ABSTRACT

*Pohribnyi V.V.* Methodology for assessing the bearing capacity of reinforced concrete and masonry structures using conditions of extreme deformation. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.23.01 – "Building structures, buildings and structures" (19 – "Architecture and civil engineering". – National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, 2024.

In the **introduction**, the relevance of the problem being solved is substantiated, the goal, the tasks of the research, the scientific novelty and the practical significance of the obtained work results are formulated.

In the **first chapter** of the dissertation, the main stages and perspectives of the development of the theory of plasticity and variational calculus, discrete and discontinuous solutions, strength conditions for quasi-brittle materials, which include concrete and masonry, are analyzed.

The analysis of methods for calculating the bearing capacity of reinforced concrete and masonry structures under shear confirms the possibility of their improvement based on solving problems of the strength of members by the variational method, taking into account the specifics of the stress-strain state.

When evaluating the bearing capacity of reinforced concrete beams reinforced with high-strength reinforcement in a normal section using a nonlinear deformation model, in order to avoid sudden failure of concrete, it is necessary to establish the limit strain, the value of which is unambiguously uncertain.

In the **second chapter**, the mathematical apparatus of the theory of plasticity is adapted for solving problems of the strength of concrete and reinforced concrete members. Velocity jumps in the directions tangential and normal to the failure surface are considered, which is due to the dilatancy of concrete in the limit state. The value of the limit load corresponds to the minimum power of plastic strain in a thin layer on the shear surface. A check of the adapted mathematical apparatus was carried out when using discontinuous solutions under the Balandin-Heniev strength condition under plane strain and plane stress.

In the **third chapter**, the strength of concrete and masonry members was evaluated by the variational method under axial and eccentric compression, combined action of vertical and horizontal load, local one-sided and two-sided compression. The kinematic schemes of failure are proposed and dependences for calculating the strength of members are obtained. The influence of determining factors has been established.

The combination of the characteristics of the strength of bricks and stones of the correct shape and the strength of mortar seams, for which the masonry can be considered monolithic and the calculated cross-section passes through the brick (stone) are determined

The **fourth chapter** is devoted to the assessment of the bearing capacity of beam reinforced concrete and reinforced masonry structures according to the normal section.

The value of the limit strain of concrete  $\eta_R$  on the "stress-strain" diagram of compression, upon reaching which the macrodestructuring of concrete (masonry) occurs, is set. To determine its level, the extreme principle in the theory of plasticity is applied: the maximum stress increment during deformation, the most possible without macrodisruption of the structure of concrete or masonry.

For ease of use, the limited descending branch of the diagram is described by a polynomial of the 5th degree harmonized to the fractional-rational function, which makes it possible to obtain sufficiently simple dependencies for determining the parameters of the compressed zone of concrete.

Based on the obtained results, a methodology for assessing the bearing capacity in normal cross-sections of beam-reinforced concrete structures reinforced with high-strength reinforcement, as well as reinforced concrete and reinforced masonry structures, over-reinforced in normal cross-sections as a result of damage to their compressed zone during operation, is proposed.



The **fifth chapter** is devoted to the assessment of the bearing capacity of structures based on the solution of shear strength problems obtained by the variational method.

The calculation of the bearing capacity of reinforced concrete beams in an inclined section is based on the combination of the results of solving the problems of the strength of the inclined compressed strip in the zone near the support and the strength of the elements behind the dangerous inclined crack, taking into account the wedge-shaped compressed zone. The bearing capacity is taken as the smaller of the values of the shear force, taking into account the influence of concrete and shear reinforcement in both cases.

A method of calculating the bearing capacity of reinforced concrete corbels on an inclined strip, taking into account the peculiarities of its stress-strain state, masonry structures under the combined action of vertical and horizontal (seismic) loads, at the local compression of supporting sections, has been developed.

In the **sixth chapter**, the results of comparing the strength values of the elements and the bearing capacity of the structures, calculated according to the proposed methods, with the experimental ones obtained by the author and other researchers, which confirm their reliability, are given.

The **seventh chapter** engineering methods for calculating the bearing capacity of structures have been developed, and their constructive solutions have been improved.

**Keywords:** strength, bearing capacity, extreme principles, theory of plasticity, discontinuous solutions, reinforced concrete and masonry structures, strain.