

Міністерство освіти і науки України

Одеська державна академія будівництва та архітектури

**Гриньова Ірина Іванівна**



УДК 624.012.82

**НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ТА ЗАЛИШКОВА НЕСУЧА  
ЗДАТНІСТЬ КАМ'ЯНИХ СТОВПІВ**

05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі та споруди

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса – 2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Одеській державній академії будівництва та архітектури  
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Клименко Євгеній Володимирович**,  
завідувач кафедри залізобетонних конструкцій  
та транспортних споруд Одеської державної  
академії будівництва та архітектури.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Савицький Микола Васильович**,  
ректор, професор кафедри залізобетонних і  
кам'яних конструкцій Придніпровської  
державної академії будівництва та архітектури  
(м. Дніпро) Міністерства освіти і науки  
України;

кандидат технічних наук, доцент  
**Довженко Оксана Олександрівна**,  
професор кафедри залізобетонних і кам'яних  
конструкцій та опору матеріалів Полтавського  
національного технічного університету імені  
Юрія Кондратюка Міністерства освіти і науки  
України.

Захист дисертації відбудеться « 2 » липня 2019 р. о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.085.01 при Одеській державній академії будівництва та архітектури за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4, ауд. а.360.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Одеської державної академії будівництва та архітектури за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4

Автореферат розісланий « 31 » травня 2019 р.

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



С.О. Кровяков

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Проблема оцінювання залишкової несучої здатності елементів кам'яних конструкцій останнім часом інтенсивно зростає у зв'язку з тим, що вік значної частини будівель і споруд, які будувалися 50 і більше років тому, наближаються до нормативного терміну служби.

Для попередження руйнувань існуючих будівель і споруд, а також оптимізації рішень, пов'язаних з підсиленням і реконструкцією пошкоджених кам'яних конструкцій, необхідно мати інформацію про їх рівень залишкової несучої здатності. У той же час чинні норми – ДБН В.2.6-162: 2010, а також СНиП II-22-81\* не дають рекомендацій щодо оцінювання залишкової несучої здатності пошкоджених елементів кам'яних конструкцій. Аналіз результатів інструментальних та візуальних обстежень показує, що залишковий ресурс пошкоджених елементів кам'яних конструктивних значно недооцінюється.

Виходячи з викладеного, удосконалення існуючих та розроблення нових методів визначення залишкової несучої здатності пошкоджених кам'яних конструкцій є актуальним науковим завданням, розв'язання якого може істотно підвищити точність розрахунків несучих будівельних конструкцій.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота відповідає переліку напрямів наукових досліджень, зорієнтованих на підвищення надійності будівельних конструкцій та виконана в рамках тематичного плану науково-дослідницьких робіт кафедри Залізобетонних конструкцій та транспортних споруд Одеської державної академії будівництва та архітектури, у тому числі у рамках держбюджетних теми «Науково-технічна оцінка бетонних та залізобетонних стиснутих конструкцій, пошкоджених в процесі експлуатації» (номер державної реєстрації – 0113U000053).

**Мета роботи:** розробка моделі кількісної оцінки несучої здатності позацентрово стиснутих пошкоджених кам'яних стовпів на основі вивчення їх напружено-деформованого стану.

**Завдання досліджень** полягають у наступному:

1. Створити модель визначення залишкової несучої здатності позацентрово стиснутих кам'яних стовпів, пошкоджених в процесі експлуатації.
2. Провести натурний експеримент із вимірюванням переміщень і максимального руйнівного навантаження дослідних зразків.
3. Розробити методику експериментальних досліджень пошкоджених позацентрово стиснутих кам'яних стовпів.
4. Виконати моделювання роботи пошкоджених позацентрово стиснутих кам'яних стовпів у програмних комплексах ЛІРА САПР та ANSYS.
5. Встановити вплив різних значущих чинників на залишкову несучу здатність позацентрово стиснутих пошкоджених кам'яних стовпів.
6. Скласти алгоритм визначення залишкової несучої здатності стиснутих кам'яних конструкцій пошкоджених у процесі експлуатації.
7. Впровадити результати досліджень у практику реконструкції будівель та навчальний процес закладів вищої освіти будівельного профілю.

**Об'єкт дослідження:** процес деформування і руйнування пошкоджених в процесі експлуатації позацентрово стиснутих кам'яних стовпів з різними параметрами пошкодження.

**Предмет дослідження:** напружено-деформований стан і залишкова несуча здатність пошкоджених позацентрово стиснутих кам'яних стовпів.

**Методи дослідження:** збір, вивчення та аналіз літературних джерел, математична теорія планування експерименту, сучасні методи вимірювання деформацій матеріалів, обробка та аналіз результатів експериментів, математичне та фізичне моделювання напружено-деформованого стану дослідних зразків, порівняння результатів моделювання з експериментальними даними.

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає в наступному:

**вперше:**

- отримані експериментальні дані щодо роботи пошкоджених кам'яних стовпів;

- визначено ступінь впливу факторів пошкодження, а також ексцентриситету прикладання зовнішнього стискаючого зусилля на несучу здатність кам'яних стовпів, пошкоджених в процесі експлуатації;

**отримала подальший розвиток:**

- розрахунок залишкової несучої здатності пошкоджених кам'яних конструктивних елементів будівель і споруд на основі основних положень чинних нормативних документів;

**удосконалено:**

- методику розрахунку несучої здатності кам'яних конструкцій.

**Практичне значення результатів роботи:**

Автором в результаті проведених експериментально-теоретичних досліджень створено розрахункову модель пошкоджених стиснутих кам'яних стовпів, яку можна застосовувати в практиці будівництва і реконструкції будівель та споруд, що дозволить раціонально підходити до питання підсилення і ремонту пошкоджених стиснутих елементів, знаючи їх залишкову несучу здатність.

Результати, отримані в дисертаційній роботі, впроваджені при розробці проекту капітального ремонту будівлі складу № 8 за адресою: вул. Митна площа, 1 в м. Одеса, а також у навчальний процес Одеської державної академії будівництва та архітектури при підготовці магістрів спеціальності «Будівництво та цивільна інженерія» спеціалізації «Промислове та цивільне будівництво».

**Особистий внесок здобувача.** Представлені в дисертаційній роботі результати досліджень отримані автором самостійно. Особистий внесок полягає у:

- плануванні та проведенні експериментальних досліджень залишкової несучої здатності пошкоджених, позацентрово стиснутих кам'яних стовпів;

- отриманні експериментальних значень несучої здатності пошкоджених стовпів;

- аналізі отриманих результатів натурних та числових експериментів з визначення максимального руйнуючого навантаження;
- розробленні моделі визначення залишкової несучої здатності.

**Апробація результатів роботи.** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на наступних конференціях: міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених «Нові матеріали, обладнання та технології в промисловості» (Могильов, Білорусь, 2016 р.), міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Буд-майстер-клас-2016» (Київ, 2016 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону» (Полтава, 2017 р.); міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених «Нові матеріали, обладнання та технології в промисловості» (Могильов, Білорусь, 2017 р.); II міжнародній конференції «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд» (Одеса, 2017 р.); міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Буд-майстер-клас-2017» (Київ, 2017 р.); XLVII науково-технічній конференції факультету будівництва, теплоенергетики та газопостачання (Вінниця, 2018 р.); 78 міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпро, 2018 р.); I Міжнародній науково-практичній конференції «Technology, engineering and science – 2018» (Лондон, Великобританія, 2018 р.); 71, 72, 73 та 74-й науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу ОДАБА (Одеса, 2015 – 2018 р.р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи викладено у 19 наукових працях, серед них: 5 публікацій у наукових фахових виданнях України, 2 – у наукових періодичних виданнях іноземних держав, 8 тез доповідей на наукових конференціях, а також 4 статті, що додатково відображають результати роботи, дві з яких включено до міжнародних наукометричних баз.

**Обсяг і структура роботи.** Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, додатків. Робота викладена на 168 сторінках, які включають 113 сторінок основного тексту, 17 таблиць та 69 рисунків, 3 додатки та список використаних джерел із 138 найменувань, викладений на 15 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі роботи приведене обґрунтування вибору теми дослідження, сформульовані мета та задачі досліджень, наукова новизна та практичне значення роботи, представлена її загальна характеристика та зв'язок з науковими програмами.

**Перший розділ** дисертації містить огляд та аналіз існуючих досліджень стосовно вивчення працездатності та напружено-деформованого стану за дії ексцентрично прикладених стискаючих навантажень. Особливу увагу приділено розгляду існуючих нормативних та авторських методів розрахунку залишкової несучої здатності стиснутих кам'яних елементів за дії моменту, як в одній, так і в двох площинах.

В ході літературного аналізу встановлено, що особливості впливу складного навантаження (позацентрний стиск) на роботу конструкцій та вплив на них оточуючого середовища розглядалися в роботах Оніщика Л.І., Попова М.М., Забегаєва А.В., Вахненко П.Ф., Клименка Є.В., Некрасова В.П., Сафаргалієва С.М., Копейко А.Є., Белова В.В., Костенка О.М., Кадимова О.К., Фабричної К.А., Савицького М.В., Дорофєєва В.С., Довженко О.О., Шаповал С.Л., Черневої О.С., Улибіна О.В., Зубкова С.В., Деркача В.Н., Орловича Р.Б., Samui P., Kys K., Tianyi Yi., Milani G., Rossi M., Calderini C., Lagomarsino S. та інших.

Аналіз літературних джерел показав, що недостатньо вивченою є робота позацентрво стиснутих кам'яних конструкцій із пошкодженнями по висоті.

За результатами літературного огляду сформульовані завдання дисертаційного дослідження про вплив різних чинників і факторів зовнішнього впливу на характер деформування та руйнування кам'яних стиснутих елементів, пошкоджених в процесі експлуатації, та створення моделі розрахунку таких конструкцій.

**У другому розділі** роботи наведені план експериментальних досліджень, обґрунтування та передумови вибору факторів варіювання, детальний опис методики проведення випробувань дослідних зразків-стовпів.

В рамках запланованих досліджень були проведені випробування серії стовпів із 15 повномасштабних моделей прямокутного перерізу,  $b \times h = 510 \times 640$  мм і висотою 840 мм. Пошкодження створювалося в середній третині стовпчика у вигляді різної глибини і нахилу до головних осей перерізу площини пошкодження в поєднанні з різними ексцентриситетами прикладання зовнішнього навантаження. Для виготовлення зразків використовувалася цегла керамічна рядова повнотіла з маркою за міцністю М 100 та маркою за морозостійкістю F 100 Татарбунарського цегляного заводу (Одеська область). Розчин виготовлявся з цементу ПЦ II/Б–III–400 Одеського цементного заводу і піску з модулем крупності 1,4.

Режим проведення експерименту був однаковий для усіх стовпів. Варіювання параметрів плану експерименту проводилося в досить широкому (з точки зору випадків експлуатації) діапазоні: кут нахилу фронту пошкодження до однієї з головних осей поперечного перерізу становив  $\theta = 0^\circ; 22,5^\circ; 45^\circ$ ; глибина пошкодження  $a = 0$  мм; 160 мм; 320 мм і відносний ексцентриситет  $e_0 = 0$  мм; 80 мм; 160 мм. Заплановані серії дослідів виконували за трифакторним трирівневим планом Бокса-Бенкіка. У даній роботі кожен з прийнятих вхідних факторів варіюється на трьох рівнях. Отриманий набір станів об'єкта дослідження дозволяє отримати вихідні параметри залишкової несучої здатності зразків і сформулювати її залежність від значень глибини і кута нахилу фронту ушкоджень, а також відносного ексцентриситету прикладання навантаження у вигляді функції другого порядку. Вхідні фактори в кодованому вигляді залежно від діапазону (розмаху) варіювання наведені в таблиці 1.

Випробування зразків проводилось статичним навантаженням до руйнування, що дозволило спостерігати в процесі експерименту усі стадії їх

роботи. Перед початком випробувань для направленої їх проведення були виконані теоретичні розрахунки з визначення зусиль, що відповідають руйнуванню. Випробування стовпчиків на короткочасну дію стискаючого навантаження проводилось на 500-тонному гідравлічному пресі типу 2ПГ-500.

Таблиця 1

## Фактори варіювання

Вхідний фактор			Рівні варіювання			Розмах варіювання	Інтервал варіювання
код	значення	од. вим.	«-1»	«0»	«1»		
$x_1$	Кут нахилу фронту пошкодження $\theta$	град.	0	22,5	45	45	22,5
$x_2$	Глибина пошкодження $a_1$	мм	0	160	320	320	160
$x_3$	Відносний ексцентриситет $e_0/h$	-	0	1/8	1/4	1/4	1/8

Для вимірювання деформацій цегляної кладки використовували індикатори годинникового типу ИЧ-10 із ціною поділки 0,01 мм. База приварювалася до нижньої її опори та центрувалася до осі датчика на рівній скляній поверхні (рис. 1, а).

Схема розташування індикаторів дослідного зразка представлені на рис. 1, б.

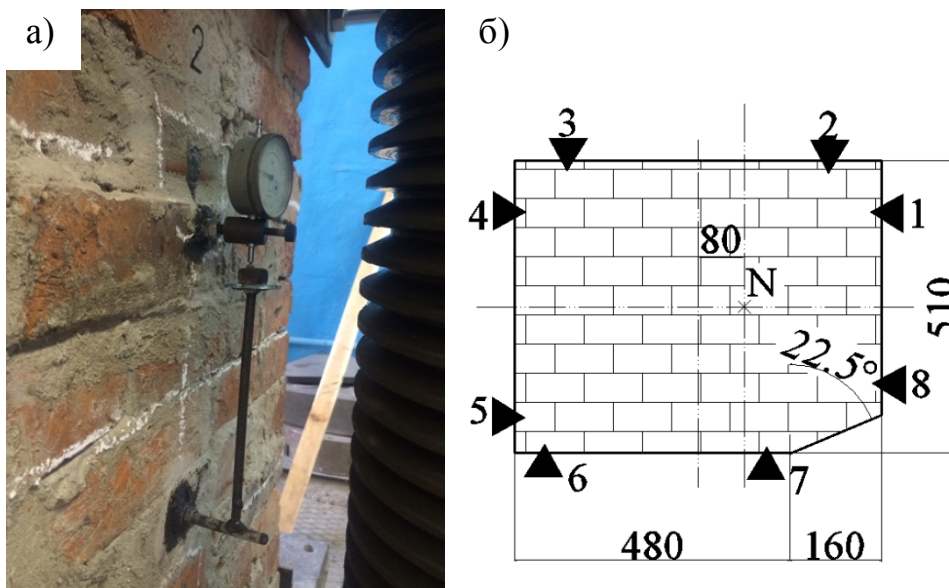


Рис. 1 Розташування приладів на дослідних зразках: а – кріплення індикатора годинникового; б – схема розташування у перерізі

Були випробувані тестові зразки для контролю міцності цегли та розчину. Результати випробувань були використані для подальшого визначення несучої здатності пошкоджених зразків в ПК ЛІРА САПР і ПК ANSYS та при обробці результатів натурних випробувань.

**Третій розділ** дисертації присвячений аналізу отриманих експериментальних даних та результатів числового експерименту у програмних комплексах LIRA-SAPR, ANSYS, COMPEX. Розглядається характер сумісної роботи цегли та розчину у пошкоджених позацентрово стиснутих кам'яних конструкціях з загальними фізико-механічними характеристиками для кам'яної кладки. Досліджувалися переміщення дослідних зразків (деформації стовпа), значення руйнуючого навантаження та тип руйнування, а також залежність «напруження-деформації» для кладки. Випробування зразків починали з контрольного навантаження зусиллями рівним 1/10 руйнуючого. При цьому пристрої, встановлені на протилежних гранях зразка симетрично відносно силової площини, повинні показувати однакові деформації. У випадку суттєвої різниці в показах приладів на бокових гранях зразок розвантажували, переміщували його у потрібному напрямку та знову проводили контрольне обтиснення. Результати відліків індикаторів не відрізнялись один від одного більше ніж на 15%.

На рис. 2 показаний вид руйнування дослідного зразка стовпа з центральним стисненням, а на рис. 3 наведений графік повздовжніх деформацій.

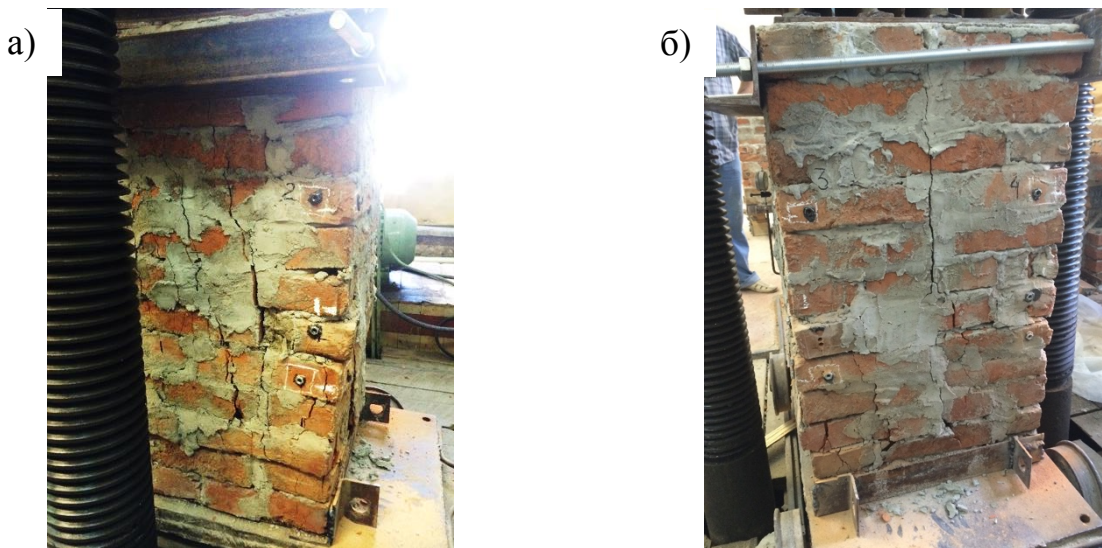


Рис. 2 Випробування дослідного зразка стовпа при центральному стиску:  
а – С -1 -1 -1; б – С 1 -1 -1

Експериментально-статистичне моделювання, виконане в ПК «COMPEX», дало можливість проаналізувати чисельну залежність між несучою здатністю стовпів і вхідними факторами. За оцінками ЕС-моделі і однофакторних локальних полів вагомий вплив на руйнуюче навантаження  $N$  має фактор  $x_2$ : із збільшенням глибини пошкодження в перерізі колони значно зменшується руйнівне навантаження, так в зоні максимальних значень у 8,5 раз.



У зв'язку з тим, що найбільше граничне навантаження  $N_{max}$  досягається на виробах з нульовою глибиною пошкодження ( $x_2 = -1$ ), подальший аналіз впливу двох інших факторів  $x_1$  і  $x_3$  логічно звести до двохфакторної моделі (рис. 4).

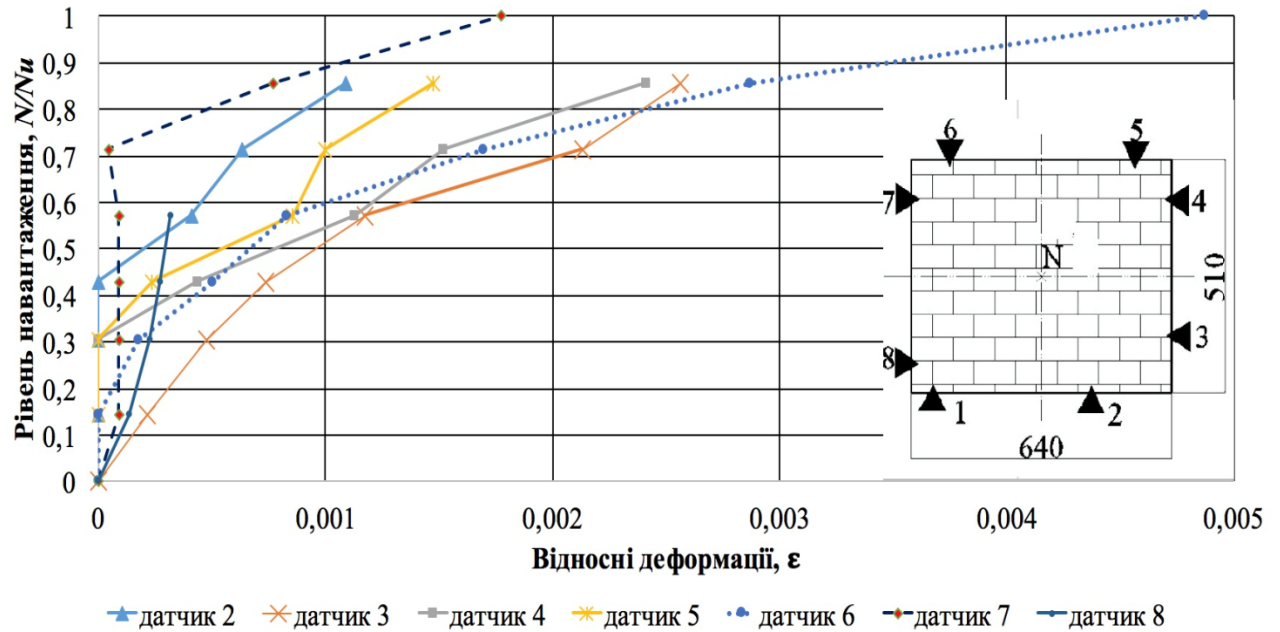


Рис. 3 Деформації кладки стовпа С -1 -1 -1

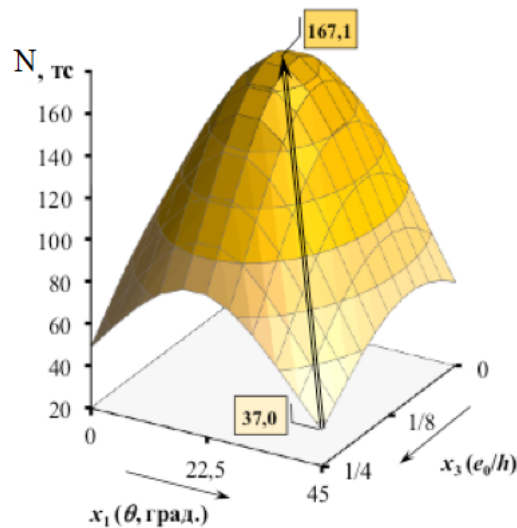


Рис. 4 Вплив факторів  $x_1$  і  $x_3$  на руйнівне навантаження стовпів за умови відсутності пошкоджень  $x_2 = -1$

Результати експериментально-статистичного моделювання дозволили встановити вплив кожного з обраних факторів на несучу здатність, а також взаємний вплив факторів:

1. Модель експерименту адекватна при похибці 5,71 кН, з 8 статично значущими коефіцієнтами (1).

2. Найбільший вплив на несучу здатність має глибина пошкодження в перерізі стовпа.

3. Відносний ексцентриситет прикладання сили (в межах, що розглядалися) практично не впливає на величину руйнівного зусилля. Так, зі збільшенням

ексцентриситету прикладеного навантаження,  $N$  спочатку зростає приблизно на 2-3% при  $x_3=1,25 e_0/h$ , а потім знижується на 4-6% при  $x_3=0,25 e_0/h$ .

$$\ln\{\mathbf{R}_u\} = 4.075 + 0.497x_1 - 0.721x_1^2 + 0.634x_1x_2 \pm 0x_1x_3 - 1.008x_2 \pm 0x_2^2 \pm 0x_2x_3 - 0.239x_3 - 0.374x_3^2 \quad (1)$$

Комп'ютерне моделювання роботи стовпів реалізовувалося у ПК ЛПА-САПР та ПК ANSYS за допомогою метода скінченних елементів (СЕ). При моделюванні кожного зразка враховувалися геометричні характеристики таким чином, щоб змодельована модель була ідентична натурному зразку. Модель стовпа була розбита на скінченні елементи у вигляді прямокутних паралелепіпедів, що задавалися фізично – нелінійними просторовими восьми- і шести-вузловими ізопараметричними СЕ типів 236 і металева пластина для передачі навантаження 234 відповідно з урахуванням геометричної та фізичної нелінійності. Залежність «напруження-деформації» для цегляної кладки задавалася у вигляді кусочно-лінійного закону деформування №14. Вузли стовпів біля основи (на позначці 0,0 м) закріплювалися від лінійних переміщень в напрямках осей  $x$ ,  $y$  і  $z$ .

У ПК ANSYS розроблено алгоритм методу послідовних наближень для реалізації моделі пружно-крихкої поведінки матеріалів і створена програма (макрос) на мові параметричного проектування APDL. Нелінійний розрахунок виконувався методом Ньютона-Рафсона з використанням повної процедури NROPT, FULL і автоматичним вибором кроку.

Зіставлення експериментальних даних з результатами розрахунків ЛПА САПР дає близькі до експериментальних значення. Максимальна розбіжність за напруженнями складає 15,6%, а за переміщеннями – 12,8%. Аналіз співставлення натурних результатів з розрахунковими свідчить про те, що експериментальні дані і результати розрахунку в ANSYS досить добре узгоджуються один з одним максимальне розбіжність за напруженнями становить 16,2%, а за переміщеннями – 12,3%.

**У четвертому розділі** дисертації представлені теоретичні основи і передумови для створення моделі розрахунку залишкової несучої здатності стиснутих кам'яних стовпів, які отримали пошкодження в процесі експлуатації.

Основні передумови розрахунку:

1. Напруження в стиснутій зоні розподіляються рівномірно.
2. Фронт пошкодження має прямолінійний обрис.
3. Приймається гіпотеза плоских перерізів, тобто після деформування переріз залишається плоским, а по висоті перерізу деформації змінюються за лінійною залежністю.
4. Центр мас стиснутої зони співпадає з точкою прикладання поздовжньої сили  $N$ .

5. Робота розтягнутої зони в сприйнятті зовнішнього зусилля не враховується.

Як наслідок з четвертої передумови, координати центру мас стиснутої зони щодо головних осей при пошкодженні перерізу приймаються  $x_1 = 0$ ;  $y_1 = e_0$ .

Центр мас стиснутої зони кам'яного стовпа збігається з точкою прикладання зовнішнього стискаючого зусилля (рис. 5).

Умова рівноваги:

$$\Sigma Z = 0; N - f_u \cdot A_c = 0, \quad (2)$$

$$\Sigma M_0 = 0; N_c \cdot \frac{x}{2} = N \cdot \frac{x}{2}, \quad (3)$$

де  $A_c$  – площа стиснутої зони;  $x$  – висота тієї ж зони.

У даному дослідженні плоским вважалось пошкодження, коли фронт його був паралельний одній з головних осей непошкодженого перерізу, тобто кут нахилу пошкодження дорівнював нулю (рис. 5).

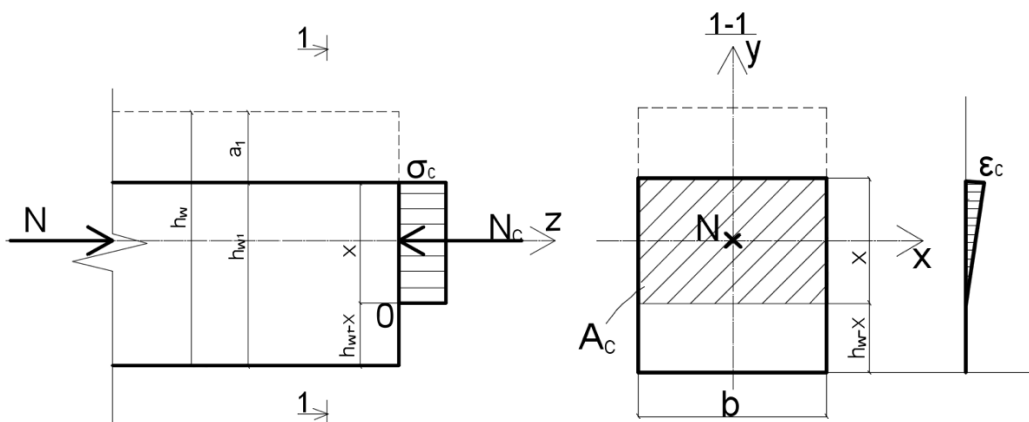


Рис. 5 Розрахункова схема поперечного перерізу позациентровано стиснутого елемента

Косе пошкодження має місце тоді, коли фронт пошкодження (в цьому випадку – теж пряма лінія) не паралельний жодній з головних осей непошкодженого перерізу, тобто кут нахилу лінії фронту пошкодження не дорівнює нулю ( $\theta \neq 0$ ) (рис. 6, б, в).

Залежно від глибини пошкодження ( $a_1$ ,  $b_1$ ) і кута нахилу фронту пошкодження ( $\theta$ ) до осі ( $x$ ;  $y$ ) розрахунок можна звести до декількох випадків. Випадок I має місце, коли  $b_1 < b/2$  (рис. 6, б). Якщо  $b/2 < b_1 < b$ , то це випадок II (рис. 6, в).

З урахуванням позначення висоти (глибини) пошкодження ( $a_1$ ) та відстані на якій прикладається зусилля  $N$  ( $e_0$ ), висота стиснутої зони кам'яного стовпа позначена традиційно  $x$ . Стиснута зона складної геометричної форми, якщо потрібно поділяється на найпростіші плоскі фігури. Визначаємо допоміжні геометричні параметри поперечного перерізу (рис. 6, а, б, в).

Виходячи з умов (2-3), для реалізації четвертої передумови рівняння статичних моментів та площі стиснутої зони  $A_c$  відносно точки прикладання сили, у загальному вигляді для плоского пошкодження при  $a_1 < a/2$ ,  $\theta = 0$  матиме вигляд:

$$S_x = A_1 \cdot y_1 + A_2 \cdot y_2 = (x - a_1 - a_3) \cdot b \cdot \left( \frac{a}{2} - a_1 - \frac{a_2}{2} \right) + \frac{a_3 b}{2} \cdot \left( - \left( \frac{a}{2} - (a - x) + e_0 - \frac{2a_3}{3} \right) \right) = 0; \quad (4)$$

$$S_y = A_1 \cdot y_1 + A_2 \cdot y_2 = \frac{a_3 b}{2} \cdot \left( \frac{b}{2} - \frac{b}{3} \right) = 0; \quad (5)$$

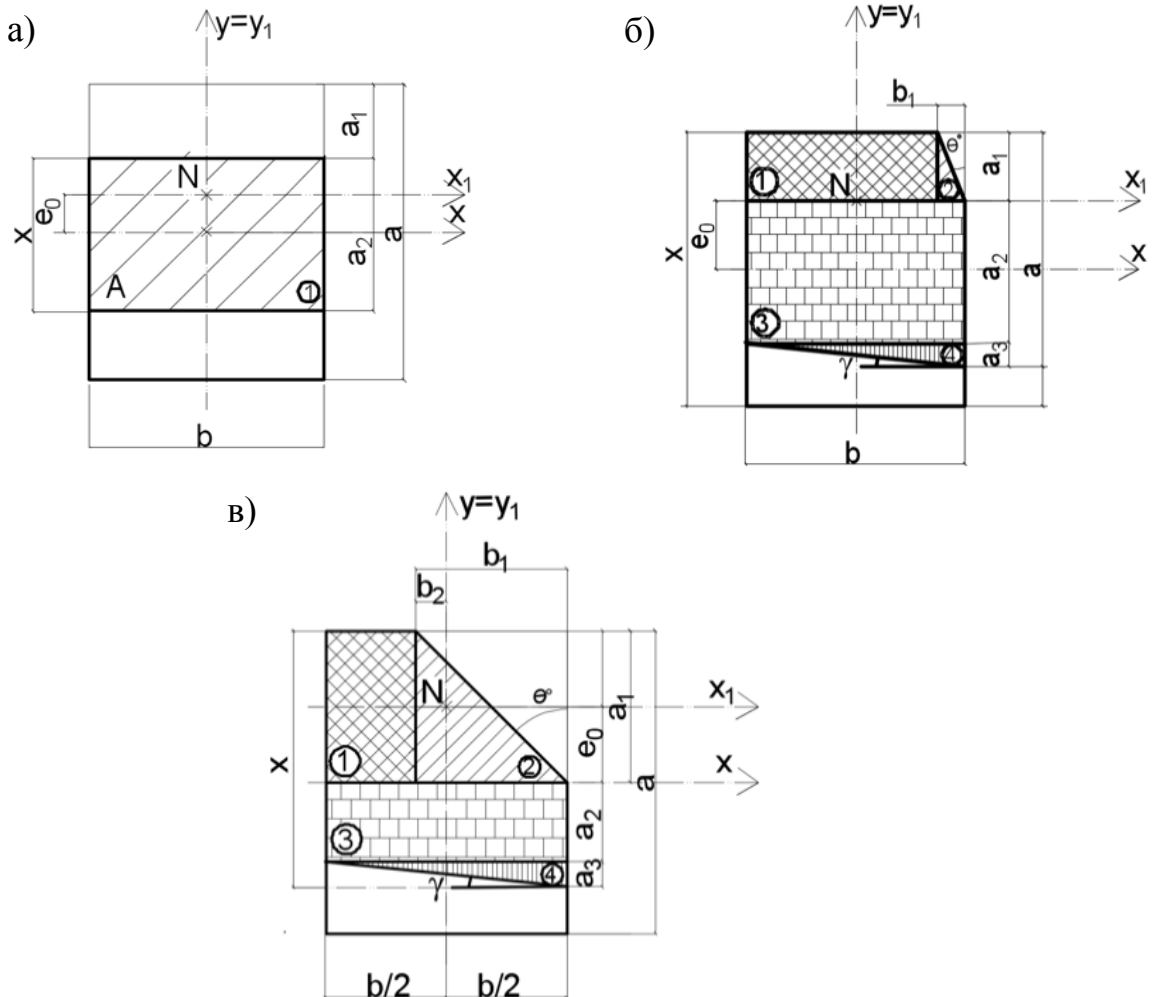


Рис. 6 Поперечний переріз в разі плоского пошкодження:  
 а – при  $a_1 < a/2$ ,  $\theta = 0$ ; б – при  $b_1 < b/2$ ,  $\theta \neq 0$ ; в – при  $b/2 < b_1 \leq b$ ,  $\theta \neq 0$

$$A_c = A_1 + A_2 = (x - a_1 - a_3) \cdot b + \frac{a_3 b}{2}; \quad (6)$$

– при  $b_1 < b/2$ ,  $\theta \neq 0$ ;

$$S_{x_1} = (b - b_1) \cdot a_1 \cdot \left( \frac{a_1}{2} - e_0 \right) + \left( \frac{a_1 b_1}{2} \cdot \left( \frac{a_1}{3} - e_0 \right) \right) + (a_2 b) \cdot (a_2 + e_0) + \left( \frac{a_3 b}{2} \cdot \left( x - a_1 + e_0 - \frac{2a_3}{3} \right) \right) = 0; \quad (7)$$

$$S_{y_1} = (b - b_1) \cdot a_1 \cdot \frac{b - (b - b_1)}{2} + \frac{a_1 b_1}{2} \cdot \left( \frac{b}{2} - \frac{2b_1}{3} \right) + \frac{a_3 b}{2} \cdot \left( \frac{b}{2} - \frac{b}{3} \right) = 0; \quad (8)$$

– при  $b/2 < b_1 \leq b$ ,  $\theta \neq 0$ ;

$$S_{x_1} = (b-b_1) \cdot a_1 \cdot \left( \frac{a_1}{2} - e_0 \right) + \frac{a_1 b_1}{2} \cdot \left( \frac{a_1}{3} - e_0 \right) + a_2 b \cdot \left( x - \frac{a_2}{2} - a_3 - (a_1 - e_0) \right) + \frac{a_3 b}{2} \cdot \left( x - (a_1 - e_0) - \frac{2a_3}{3} \right) = 0; \quad (9)$$

$$S_{x_1} = (b-b_1) \cdot a_1 \cdot \frac{b-(b-b_1)}{2} + \frac{a_1 b_1}{2} \cdot \left( b_1 - b_2 - \frac{2b_1}{3} \right) + \frac{a_3 b}{2} \cdot \left( \frac{b}{2} - \frac{b}{3} \right) = 0; \quad (10)$$

Площа стиснутої зони в обох випадках знаходиться за виразом:

$$A_c = (b-b_1) \cdot a_1 + \frac{a_1 b_1}{2} \cdot \left( b_1 - b_2 - \frac{2b_1}{3} \right) + \frac{a_3 b}{2} \cdot \left( \frac{b}{2} - \frac{b}{3} \right). \quad (11)$$

Вирішуючи спільно три рівняння, отримуємо площу стиснутої зони  $A_c$ . Згідно з першим рівнянням рівноваги (2) знаходимо максимальне руйнуюче навантаження ( $N$ ), несучу здатність пошкоджених кам'яних стовпів.

Особливий випадок розрахунку з великою глибиною пошкодження (при  $a_1 \geq a/2$ ). У випадку пошкодження з великою глибиною, коли навантаження прикладається поза межами стиснутої зони, має місце стиснення з істотним згинальним моментом і руйнування розпочинається з розтягнутої зони, тобто міцність елемента буде визначатися міцністю розтягнутої зони кладки. (рис. 7).

Для простоти розглянемо плоске пошкодження (рис. 8).

У разі, коли визначальною є міцність роботи кладки на розтяг, випадок з відносно великим ексцентриситетом прикладення навантаження, чинить опір зовнішньому впливу (в граничному стані це залишкова несуча здатність ( $N$ ) стиснута ( $N_c$ ) розтягнута ( $N_t$ ) зони кам'яних конструкцій (рис. 8).

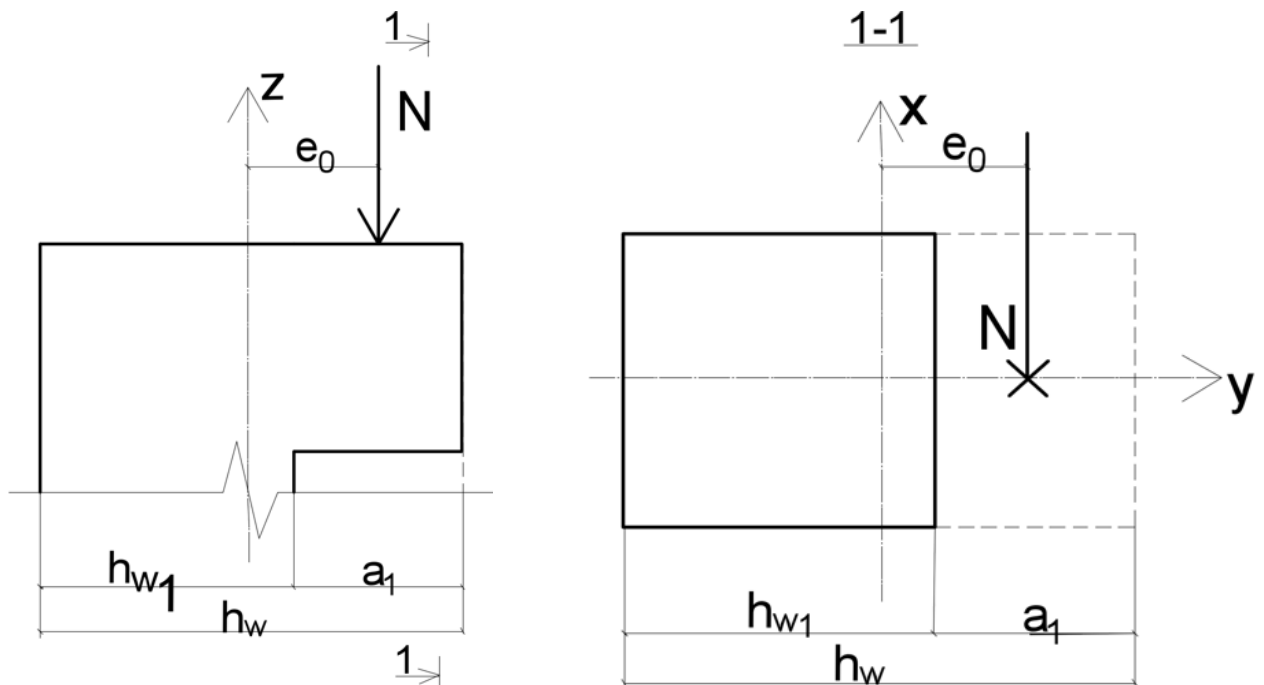


Рис. 7 Випадок прикладення зовнішнього зусилля за межами стиснутої зони

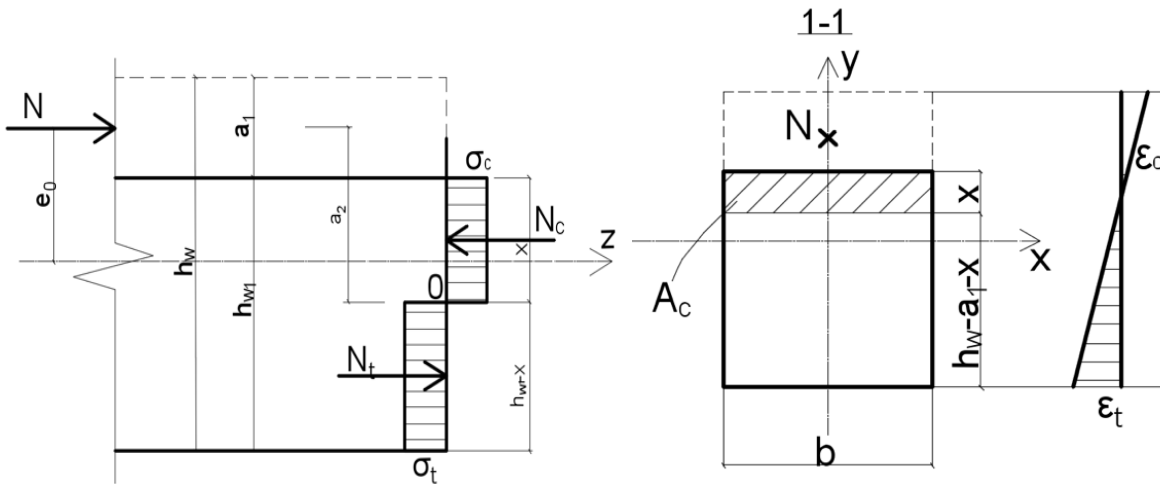


Рис. 8 Випадок прикладання зовнішнього зусилля за межами стиснутої зони з відносно невеликими напруженнями

Оскільки напруження у стиснутій зоні кам'яної конструкції далекі до граничних, як передумова до розрахунку, приймалась пружна робота кладки у цій зоні і трикутна епюра стискаючих напружень з максимальною ординатою  $\sigma_c$ , що відповідає поточним значенням відносних деформацій  $\epsilon_c$ . Така передумова приймається для невеликих рівнів напружень ( $\sigma_c \leq f_u$ ), що узгоджується з рекомендаціями нормативних документів. Для високих рівнів напружень ( $\sigma_c = f_u$ ), приймається прямокутна епюра їх в стиснутій зоні кладки (рис. 9).

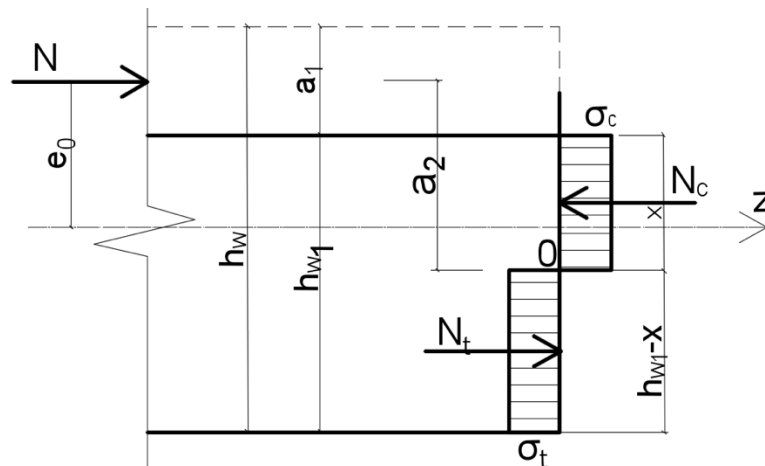


Рис. 9 Розрахункова схема з прикладанням зовнішнього зусилля за межами перерізу з високими напруженнями у стиснутій зоні

У першому випадку (у разі прийняття пружної роботи кам'яної кладки в стиснутій зоні) (рис. 8) розглядаємо два рівняння рівноваги, а саме: суму проєкцій усіх зусиль на поздовжню вісь елемента ( $z$ ) повинна дорівнювати нулю. Для дотримання умов граничної рівноваги (метод, на якому базуються діючі норми і дані пропозиції) сума моментів щодо будь-якої точки (в даному роботі – щодо точки «0» (рис. 8, рис. 9 також прирівнюється до нуля)).

Напруження в розтягнутій зоні кам'яної кладки (момент утворення першої нормальної тріщини) згідно ДБН приймаються рівними  $\sigma_t$ . Ці напруження розподілені рівномірно по розтягнутій зоні, що узгоджується з передумовами розрахунку прийнятими в ДБН.

Виходячи з таких передумов розрахунку в першому випадку (рис. 11) маємо два рівняння:

$$\Sigma Z = 0; \quad N + N_t - N_c; \quad N + \sigma_t \cdot (h_1 - x) \cdot b - f_u \cdot b \cdot x; \quad (12)$$

$$\Sigma M_0 = 0; \quad N \cdot a_2 - f_u \cdot 0,5 \cdot b \cdot x^2 + \sigma_t \cdot 0,5 \cdot b \cdot (h_1 - x)^2. \quad (13)$$

Для іншого випадку (високого рівня напружень в стиснутій зоні):

$$\Sigma Z = 0; \quad N + N_t - N_c; \quad N + \sigma_t \cdot (h_1 - x) \cdot b - 0,5 \cdot \sigma_c \cdot b; \quad (14)$$

$$\Sigma M_0 = 0; \quad N \cdot a_2 - \frac{2}{3} \cdot \sigma_c \cdot 0,5 \cdot b \cdot x^2 + \sigma_t \cdot 0,5 \cdot b \cdot (h_1 - x)^2. \quad (15)$$

У цих рівняннях:

$$a_2 = a_1 - (0,5 \cdot h_w - e_0) + x. \quad (16)$$

Для першого випадку маємо три невідомих, а саме:  $N$ ,  $x$ ,  $\sigma_c$ , а також два рівняння рівноваги. Для додавання ще одного рівняння розглянемо епюру деформацій (рис. 8). У цьому випадку також приймається гіпотеза плоских перерізів. Звідси маємо співвідношення (17)

$$\frac{\varepsilon_{t,lim}}{h_1 - x} = \frac{\varepsilon_c}{x}. \quad (17)$$

З огляду на характер роботи кам'яної кладки, відомо що:

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E}; \quad \varepsilon_t = \frac{\sigma_t}{E}; \quad \sigma_c = \frac{x}{h_1 - x} \cdot \sigma_t. \quad (18)$$

Виходячи з (18) можливо визначити значення невідомих значень.

У другому випадку розрахунку максимальних напружень у розтягнутій зоні кам'яної кладки є величина відома та у залученні додаткового рівняння необхідності немає.

Скориставшись пропозиціями даного розділу можна визначити залишкову міцність кам'яного пошкодженого стиснутого елемента і оцінити можливість його подальшої роботи після проведення заходів щодо підсилення.

В **п'ятому розділі** дисертації наведено приклади розрахунку позацентрово стиснутих стовпів: без пошкоджень, з косим пошкодженням та випадок прикладення зовнішнього зусилля за межами стиснутої зони з відносно невеликими напруженнями.

У таблиці 2 наведені значення несучої здатності, отримані експериментально, моделюванням у ПК ЛІРА САПР, ПК ANSYS та за запропонованою методикою.

Статистичні характеристики відхилень розрахункових значень залишкової несучої здатності пошкоджених кам'яних стовпів від результатів натурних експериментів наведені в таблиці 3.

Найкраще співпадання експериментальних та теоретичних значень руйнуючого зусилля має місце у разі використання запропонованої моделі (коефіцієнт варіації відношення складає 8,9%).

Таблиця 2

## Несуча здатність пошкоджених стовпів

№ з/п	Марка зразка	Експериментальна несуча здатність, $N_{\text{екс}}$ , кН	Несуча здатність за запропонованою моделлю, $N$ , кН	$\frac{N}{N_{\text{екс}}}$	Несуча здатність за ПК ЛІРА САПР, кН	Несуча здатність за ПК ANSYS, кН
1	C -1 -1 -1	767	729	0,96	799	805
2	C 0 0 -1	583	548	0,93	523	515
3	C 0 0 0	467	501	1,07	539	522
4	C 0 0 1	460	520	1,13	537	539
5	C 1 1 -1	453	417	0,92	526	527
6	C 1 -1 -1	767	729	0,96	799	805
7	C 1 0 0	307	340	1,11	359	348
8	C 1 -1 1	567	635	1,12	658	652
9	C -1 1 1	10	8,5	0,65	16	16
10	C -1 0 0	340	374	1,1	403	399
11	C 1 1 1	93	107	1,15	111	109
12	C 0 -1 1	700	756	1,08	799	804
13	C 1 -1 1	447	496	1,11	514	503
14	C -1 1 -1	23	25	1,25	29	31
15	C -1-1 1	567	635	1,12	650	652

Таблиця 3

## Статистичні характеристики

Характеристика	Модель визначення залишкової несучої здатності		
	Запропонована	ПК ЛІРА САПР	ПК ANSYS
Середнє значення відношення $\frac{N}{N_{\text{екс}}}$	1,055	1,162	1,165
Середньоквадратичне відхилення	0,095	0,181	0,194
Коефіцієнт варіації	0,089	0,156	0,166

Це дає можливість використовувати запропоновану модель для визначення залишкової несучої здатності пошкоджених кам'яних стовпів



## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Запропонована модель розрахунку пошкоджених, позацентрово стиснутих кам'яних стовпів. Розрахунок з використанням даної моделі показав задовільну збіжність з експериментальними значеннями руйнуючих зусиль. Коефіцієнт варіації відношення розрахункової залишкової несучої здатності до експериментальної склав 8,9%.

2. Випробувано 15 повномасштабних кам'яних стовпів з різними видами пошкодження та прикладення навантаження. Встановлена залишкова несуча здатність пошкоджених конструкцій, визначені параметри напружено-деформованого стану.

3. В ході проведення натурного експерименту вимірювалися переміщення в характерних перерізах стовпів по їх висоті. Отримані графіки залежності переміщень від навантаження, що дозволило відобразити дійсну картину деформування пошкоджених кам'яних стовпів. При випробуванні дослідних зразків виділено та описано 3 основних характерних випадки руйнування.

4. Аналіз результатів моделювання в ПК ЛІРА САПР дає близькі до експериментальних значення руйнуючих зусиль, так коефіцієнт варіації відношення зусиль складає 15,6%, а переміщень – 12,8%. Зіставлення експериментальних даних з результатами розрахунків в ПК ANSYS свідчать про те, що вони досить добре узгоджуються один з одним. Максимальна розбіжність зусиль становить (коефіцієнт варіації відношення теоретичного значення до експериментального) 16,2%, а за переміщеннями – 12,3%.

5. В результаті експериментально-статистичного моделювання в ПК COMPEX встановлено, що найбільший вплив на несучу здатність зразків має глибина пошкодження. Відносний ексцентриситет прикладання сили (в межах, що розглядалися) практично не впливає на величину руйнівного зусилля. Так, зі збільшенням ексцентриситету прикладеного навантаження,  $N$  спочатку зростає приблизно на 2-3% при  $x_3=1,25 e_0/h$ , а потім знижується на 4-6% при  $x_3=0,25 e_0/h$ .

6. Створена модель розрахунку пошкоджених стиснутих кам'яних стовпів базується на основних передумовах чинних норм та розширює їх дію на випадок косоного позацентрового стиску, викликаного пошкодженням частини поперечного перерізу. Виділено основні розрахункові випадки і описані їх відмінності. Створено алгоритм розрахунку пошкоджених стиснутих кам'яних елементів.

7. Результати досліджень впроваджені в практику реконструкції при розробці проекту капітального ремонту будівлі складу № 8 за адресою: вул. Митна площа, 1 в м. Одеса та в навчальний процес Одеської державної академії будівництва та архітектури.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Статті у наукових фахових виданнях України*

1. Клименко Е.В., Шаповал С.Л., Гринева И.И. Анализ расчетного и экспериментального метода определения несущей способности каменных конструкций. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2015. №57. С.189-193. (Особистий внесок здобувача: проаналізовано існуючі методи визначення несучої здатності кам'яних конструкцій).

2. Гриньова І.І. Методика проведення та результати експериментального дослідження напружено-деформованого стану пошкоджених кам'яних стовпів *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2017. №67. С. 20-26.

3. Klymenko I.V., Dovgan A.D., Grynyova I.I. Experimental-statistical modeling of the work stone pills damaged in the operation process. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2018. №70. С. 20-26. (Особистий внесок здобувача: проведення експерименту, аналіз результатів експериментально-статистичного моделювання).

4. Клименко Є.В., Гриньова І.І. Напружено-деформований стан пошкоджених у процесі експлуатації кам'яних стовпів. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2018. № 35. С. 175-181. (Особистий внесок здобувача: отримання експериментальних даних, аналіз результатів моделювання).

5. Клименко Є.В., Гриньова І.І. Залишкова несуча здатність стиснутих кам'яних стовпів. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2018. №74. С. 48 - 58. (Особистий внесок здобувача: розробка передумов розрахунку та методу визначення залишкової несучої здатності).

### *Статті у наукових періодичних виданнях інших держав*

6. Klymenko I, Grynyova I., Rusu I. Application of modern software complexes for modeling of the work of damaged stone structures. *Meridian ingineresc*. Moldova, 2019. Vol. XXV (4), pp. 67-74. (Особистий внесок здобувача: аналіз та приклад моделювання пошкоджених у процесі експлуатації кам'яних стовпів у ПК ЛІРА ).

7. Klymenko I., Grynyova I., Pents V. The work of stone pillars damaged during operation. *International Journal of Engineering and Technology*. London, 2018. Vol 7, No 4.8: pp. 174–179. (Особистий внесок здобувача: отримання експериментальних даних щодо роботи пошкоджених залізобетонних стиснутих конструкцій різної гнучкості, пропозиції щодо врахування роботи оголеного стиснутого арматурного стержня).

### *Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації*

8. Клименко Є.В., Чернева О.С., Гриньова І.І. Research issues stress-strain state and the residual load-bearing capacity of damaged stone pillars. *Build master*

class. International scientific-practical conference of young scientists. Kyiv. 2016. p.128-129 (*Особистий внесок здобувача: аналіз сучасних методів визначення несучої здатності пошкоджених кам'яних конструкцій*).

9. Клименко Є.В., Чернева О.С., Гриньова І.І. Исследование проблемы остаточного ресурса прочности поврежденных кирпичных внецентренно сжатых столбов. *Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности*: Мат. меж. науч.-тех. конф. мол. уч. Могилев, 2016. С.139-140 (*Особистий внесок здобувача: опис методики проведення експерименту, аналіз експериментальних результатів*).

10. Гриньова І.І. Оценка остаточного ресурса прочности поврежденных каменных внецентренно сжатых столбов. *Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности*: мат. меж. науч.-тех. конф. молодых уч. Могилев, 2017, С.177.

11. Klymenko I., Hrynyova I. Tense-deformed state and residual load-bearing capacity of the damaged stone pillars. Build master class. International scientific-practical conference of young scientists. Kyiv. 2017. p.198. (*Особистий внесок здобувача: опис методики проведення експерименту*).

12. Клименко Є.В., Гриньова І.І. Залишковий ресурс міцності пошкоджених кам'яних позацентрово стиснутих конструкцій. *II Міжнародна конференція. Експлуатація та реконструкція будівель і споруд*. г. Одеса. 2017. С.61-62 (*Особистий внесок здобувача: аналіз отриманих результатів експерименту*).

13. Клименко Є.В., Гриньова І.І. Моделювання роботи пошкоджених кам'яних стовпів у ПК СОМРЕХ. *74-та науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу*. г. Одеса. 2018. С. 162. (*Особистий внесок здобувача: опис методики проведення експериментально-статистичного моделювання роботи пошкоджених кам'яних конструкцій*).

14. Клименко Є.В., Чернева О.С., Гриньова І.І., Дедескул В.І. Моделювання роботи пошкоджених кам'яних стовпів у ПК ЛІРА. *74-та науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу*. г. Одеса. 2018. С.163 (*Особистий внесок здобувача: опис методики проведення моделювання роботи пошкоджених кам'яних конструкцій у ПК ЛІРА*).

15. Клименко Є.В., Гриньова І.І. Несуча здатність кам'яних стовпів пошкоджених у процесі експлуатації. *75-та науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу*. г. Одеса. 2019. С. 77 (*Особистий внесок здобувача: опис запропонованої методики розрахунку*).

*Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації*

16. Клименко Є.В., Чернева О.С., Гриньова І.І., Дедескул В.І. Застосування програмного комплексу ЛІРА для дослідження роботи пошкоджених кам'яних конструкцій. *Молодий вчений*. 2018. №3(55), С. 395-399. (індексується базою *Index Copernicus*) (*Особистий внесок здобувача: опис методики проведення моделювання роботи пошкоджених кам'яних конструкцій*).

17. Klymenko I.V., Dovgan A.D., Grynyova I.I., Cherednychenko S.P. Analysis of the effect of eccentricity on the magnitude of the destructive force of masonry. *Молодий вчений*. 2018. №4(56). С. 20-26. (індексується базою *Index Copernicus*) (Особистий внесок здобувача: аналіз результатів експериментально-статистичного моделювання).

18. Клименко Є.В., Гриньова І.І., Коцан М.А. Обзор современных методов исследования каменных конструкций. *Збірка студентських наукових праць*. 2016. С. 151-155 (Особистий внесок здобувача: аналіз сучасних методів визначення несучої здатності пошкоджених кам'яних конструкцій)

19. Клименко Є.В., Гриньова І.І., Русев Д. Методика проведення експериментального дослідження напружено-деформованого стану пошкоджених кам'яних стовпів. *Збірка студентських наукових праць*. Одеса, 2017, С.151-155 (Особистий внесок здобувача: опис методики проведення експерименту, аналіз експериментальних результатів).

## АНОТАЦІЯ

**Гриньова І.І. Напружено-деформований стан та залишкова несуча здатність кам'яних стовпів.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса, 2019.

Дисертаційне дослідження присвячене вивченню впливу різних параметрів на несучу здатність стиснутих позацентро стиснутих кам'яних стовпів, пошкоджених в процесі експлуатації.

Аналіз науково-технічної літератури та попередньо проведені дослідження дозволили визначити найбільш впливові на несучу здатність види пошкодження та рівні їх варіювання. Основними факторами обрані: кут нахилу фронту пошкодження щодо однієї з головних соєю перетинів  $\theta(x_1)$ , глибина пошкодження  $a(x_2)$  та ексцентриситет  $e_0/h(x_3)$ .

Було виготовлено і випробувано 15 дослідних зразків заввишки 840 мм, перерізом  $510 \times 640$  мм, з цегли керамічної марки F 100 на розчині M 75 із заздалегідь змодельованими ушкодженнями .

Аналізуючи вплив кута і глибини пошкодження на поведінку і характер руйнування дослідних зразків виділено 4 основні варіанти руйнування.

Розроблена модель розрахунку залишкової несучої здатності стиснутих пошкоджених кам'яних елементів.

**Ключові слова:** кам'яні конструкції, прямокутний переріз, залишкова несуча здатність, пошкодження в процесі експлуатації.

## АННОТАЦИЯ

**Гринева И.И. Напряженно-деформированное состояние и остаточная несущая способность каменных столбов.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения. – Одесская государственная академия строительства и архитектуры, Одесса, 2019.

Диссертационное исследование посвящено изучению влияния различных параметров на несущую способность сжатых внецентренно сжатых каменных столбов, поврежденных в процессе эксплуатации.

Анализ научно-технической литературы и предварительно проведенные исследования позволили определить наиболее влиятельные на несущую способность виды повреждения и их варьирования. Основными факторами избраны: угол наклона фронта повреждения по одной из главных осей сечений  $\theta(x_1)$ , глубина повреждения  $a(x_2)$  и эксцентриситет  $e^0/h(x_3)$ .

Было изготовлено и испытано 15 опытных образцов высотой 840 мм, сечением  $510 \times 640$  мм, кирпича керамического марки F 100 в растворе М 75 с заранее смоделированными повреждениями.

Анализируя влияние угла и глубины повреждения на поведение и характер разрушения опытных образцов выделено 4 основных варианта разрушения.

Разработана модель расчета остаточной несущей способности сжатых поврежденных каменных элементов.

**Ключевые слова:** каменные конструкции, прямоугольное сечение, остаточная несущая способность, повреждения в процессе эксплуатации.

## ABSTRACT

**Grynyova I. Stress-strain state and residual bearing capacity stone pillars.**  
– Manuscript copyright.

The thesis for the PhD scientific degree in specialty 05.23.01 – building constructions, buildings and structures – Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, 2019.

The dissertation is devoted to study the effect of different parameters on the carrying capacity of compressed stone pillars, damaged during operation.

In the **introduction** of work the justification of the choice of the topic of research is formulated, the purpose and tasks of research, scientific novelty and practical significance of work are formulated; its general characteristic and connection with scientific programs are presented.

First of all, the scientific novelty of the obtained results lies in the fact that the study experimentally studied the operation of stone pillars damaged during operation, investigated the effect of various damage parameters and load application, determined the degree of their influence on the load-carrying capacity of samples, determined the dependencies of deformations on the actual load, which allowed to determine the VAT of samples, to identify the main characteristic schemes of destruction, also put forward the basic prerequisites and developed a methodology for calculating the damage representations compressed stone pillars on the basis of existing regulations improved method for determining the residual load-bearing capacity of damaged compressed elements of stone, damaged during operation.

The **first chapter** thesis provides a detailed review and analysis of existing research on research capacity and stress-strain state collaboration bricks and mortar and masonry construction as a whole for the actions eccentrically applied compressive loads. Particular attention is paid to existing copyright regulations and methods for calculating the residual bearing capacity of compressed concrete elements for action moment in one and two dimensions.

During the course of the literary analysis it was established that the peculiarities of the influence of the complex loading (centripetal compression) on the work of reinforced concrete structures and the influence on them of the environment were considered in the works of Onishchik L.I., Popov M.M., Zabegayev A.V., Vakhnenko P.F. Klymenko E.V., Fabrichna K.A., Savitsky M.V., Dovzhenko O.O., Dorofeev V.S., Shapoval S.L., Cherneeva O.S., Ulibin O.V., Zubkov S.V., Derkach V.N., Orlovich R.B., Samui P., Kys K., Tianyi Yi., Milani G., Rossi M., Calderini C., Lagomarsino S. et al.

However, the researchers have not yet developed a single opinion on the impact of many factors and factors of external influence on the nature of deformation and destruction of rocky compressed elements damaged during operation. In particular, work is poorly studied, stone structures with off-center loading, with damages in the second third of the structure.

In the **second chapter** of the work, a plan of experimental studies, a rationale and prerequisites for the selection of the factors under study, a detailed description of the test methods for prototype pillars are given. Within the planned studies were conducted test series with the pillars 15 samples of rectangular section,  $b \times h = 510 \times 640$  mm, with various types of damage in the form of different depths and angles damage plane in conjunction with different eccentricity application of the external load. The variation of parameters from the experiment plan was carried out in a fairly wide (in terms of operation cases) range: the inclination angle of the damage front in one of the main axes of the cross section was  $\theta = 0^\circ; 22.5^\circ; 45^\circ$  damage depth  $a = 0$  mm; 80 mm; 160 mm and relative eccentricity  $e_0 = 0$  mm; 80 mm; 160 mm.

For the manufacture of samples, a ceramic ordinary full-bodied brick was used with a mark of 100 strength and cement PC II/B-S-400 of the Odessa Cement Plant and sand with a grain size module of 1.4.

The studies were conducted in the laboratory for testing building materials and products of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture.

The **third chapter** of the thesis is devoted to the analysis of the experimental data obtained. Two of the three factors of variation significantly affect the behavior of the pillars under a load of eccentrically applied compressive force and the nature of their destruction: the depth of damage and the eccentricity of the applied load, and the slope of the front line of damage, as the third factor in the interval from 0 to 45 degrees, influenced significantly less.

Simulation and calculation of samples that the experiment experimentally can be performed in PC ANSYS and PC LIRA SAPR. The analysis of the results shows that the experimental data and the results of the calculation in PC ANSYS are well consistent with each other maximum voltage difference of 16.2%, and the displacement of 12.3%. Comparison of experimental data with the results of calculations PC LIRA SAPR gives close to experimental values, so, the maximum difference in voltage is 15.6%, and in the movement - 12.8%. The analysis of experimental-statistical models (COMPEX) showed that the greatest influence on the load bearing capacity of samples has the depth of damage and the angle of the cut, and the effect of sample height is virtually negligible.

In the **fourth chapter** of dissertation work the theoretical bases and preconditions for creation of engineering method of calculation of residual bearing capacity of compressed damaged reinforced concrete elements of different flexibility are presented. An algorithm for calculating damaged compressed ones is created, thanks to which unknown values can be found.

In the **fifth chapter** of the dissertation, we give a detailed example of the calculation of some of the test pillars. The main calculation cases are distinguished and their differences are described. The calculation of the developed method showed the coefficient of variation of 8.9%. Thus, the method for determining the bearing capacity of damaged pillars, as described in this paper, is sufficiently precise and can be based on verification calculations in case of detecting such situations.

The results obtained in this research work are implemented in the practice of reconstruction of buildings, and also used in the educational process of institutions of higher education in Ukraine.

**Key words:** stone structures, rectangular section, residual bearing capacity, damage during operation.

Підписано до друку 30.05.2019 р.  
Формат 60 X 84/16 Папір офісний Гарнітура Times  
Друк-різографія. Ум.-друк. арк. 1,34.  
Наклад 120 прим. Зам. №19-30

Видавець і виготовлювач:  
**Одеська державна академія будівництва та архітектури**  
**Свідоцтво ДК № 4515 від 01.04.2013 р.**  
Україна, 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4.  
тел.: (048) 729-85-34, e-mail: [rio@ogasa.org.ua](mailto:rio@ogasa.org.ua)

---

Надруковано в авторській редакції з готового оригінал-макету  
в редакційно-видавничому відділі ОДАБА