

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Навчально-науковий інститут архітектури, будівництва та землеустрою
Кафедра будівництва та цивільної інженерії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ
МІЦНІСТЬ БЕТОНУ В ЗАМКНУТОМУ ПРОСТОРИ МЕТАЛЕВОЇ ТРУБИ
ПРИ СТИСКАННІ

Розробила:

студентка групи 601-БП _____ К.І. Андрієць
(підпис, дата)

Керівник:

д. т. н., професор _____ А.М. Павліков
(підпис, дата)

Допустити до захисту:

завідувач кафедри будівництва та цивільної інженерії

д. т. н., професор _____ О.В. Семко
(підпис, дата)

ЗМІСТ

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ.....	4
ВСТУП.....	7
1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ.....	13
1.1. Галузі застосування труобетонних конструкцій.....	13
1.2. Стан розрахунків труобетонних конструкцій.....	23
1.3. Теорії, які застосовано в дослідженнях.....	27
1.4. Висновки за розділом 1.....	28
2. РОЗРАХУНОК МІЦНОСТІ НОРМАЛЬНОГО ПЕРЕРІЗУ ТРУБОБЕТОННОГО ЕЛЕМЕНТА.....	30
2.1. Постулати та розрахункова схема.....	30
2.2. Виведення розрахункових формул.....	32
2.3. Методика проведення розрахунку за виведеними формулами.....	49
2.4. Приклад розрахунку міцності за розробленою методикою.....	51
2.5. Висновки за розділом 2.....	55
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ НОРМАЛЬНОГО ПЕРЕРІЗУ ТРУБОБЕТОННОГО ЕЛЕМЕНТА.....	57
3.1. Структурна схема та технологія виготовлення зразків.....	57
3.2. Методика проведення натурних випробувань для виготовлених зразків.....	60
3.3. Результати проведених випробувань.....	63
3.4. Висновки за розділом 3.....	64
4. ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕОРЕТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ З ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ ДАНИМИ.....	65
4.1. Порівняння значень коефіцієнта «зміцнення» бетону, розрахованих за різними теоріями пластичності.....	65
4.2. Порівняння експериментальних значень міцності із теоретичними, розрахованими на основі теорії пластичності Сен-Венана.....	68
4.3. Порівняння експериментальних значень міцності із теоретичними, розрахованими на основі теорії пластичності Губера-Мізеса-Генки.....	71

4.4. Порівняння точності отриманих розрахункових значень за двома розглянутими теоріями пластичності	74
4.5. Висновки за розділом 4.....	78
ВИСНОВКИ ЗА МАГІСТЕРСЬКОЮ РОБОТОЮ	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	80
ДОДАТОК А.....	86
ДОДАТОК Б.....	91
ДОДАТОК В	92

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

- A_b, A_c – площа перерізу бетонного осердя трубобетонного елемента;
- A_s – площа перерізу сталеві труби;
- A_c^0 – площа бетонного осердя, по котрій розподілений меридіональний тиск;
- A_s^0 – площа перерізу стінки сталеві труби, по котрій розподіляються кільцеві напруження;
- D – внутрішній діаметр труби-оболонки;
- $d_{зовн}$ – зовнішній діаметр труби-оболонки;
- dz – елементарна товщина;
- E_c – модуль деформацій бетону;
- E_s – модуль деформацій сталі;
- f_{cd} – розрахункове граничне значення напружень бетону при руйнуванні;
- f_{yd} – розрахункове граничне значення напружень сталі при руйнуванні;
- h – висота зразка трубобетонної колони;
- k – коефіцієнт ефективності бокового тиску;
- k_{cs} – коефіцієнт «зміцнення» бетону осердя трубобетонного елемента;
- k_{cs}^{GMG} – коефіцієнт «зміцнення» бетону за теорією Губера-Мізеса-Генки;
- k_{cs}^{CB} – коефіцієнт «зміцнення» бетону за теорією Сен-Венана;
- l_s – кінцева довжина внутрішньої поверхні сталеві труби-оболонки після її видовження;
- l_s^0 – початкова довжина внутрішньої поверхні оболонки до видовження;
- n – кількість значень;
- N_{Ed} – розрахункове значення зовнішнього прикладеного зусилля;
- N_p – рівнодійна сила від розподіленого тиску бетону на трубу;
- N_{Rd} – розрахункове значення опору дії зовнішнього зусилля, прикладеного до трубобетонного елемента;
- N_{Rd}^{GMG} – значення міцності за теорією пластичності Губера-Мізеса-Генки;
- N_{Rd}^{CB} – значення міцності, розраховане за теорією пластичності Сен-Венана;
- N_y – експериментальне навантаження в момент початку текучості сталі;

- N_ε – експериментальне навантаження в момент досягнення відносними поздовжніми деформаціями значення $\varepsilon_i = 220 \cdot 10^{-5}$;
- $N_{\sigma 2}$ – рівнодійна сила від розподіленого кільцевого напруження стінки труби;
- p – меридіональний тиск бетону на трубу;
- R – радіус бетонного осердя;
- R_b – призмova міцність бетону за нормами СНиП 2.03.01-84* [1];
- R_s – міцність сталі за нормами СНиП II-23-81* [2];
- t – товщина стінки труби;
- u_c – переміщення бетону;
- u_s – переміщення труби-оболонки;
- α – коефіцієнт ефективності роботи сталі;
- α_s – коефіцієнт співвідношення модулів деформацій сталі та бетону, який вводиться для спрощення та дорівнює $\alpha_s = E_s / E_c$;
- β – коефіцієнт ефективності роботи бетону;
- $\Delta_{N_{2M2}}$ – відносна похибка значень міцності за результатом експерименту та за теорією пластичності Губера-Мізеса-Генки;
- $\Delta_{N_{2M2},i}$ – кожне i -те значення відносної похибки значень міцності за результатом експерименту та за теорією пластичності Губера-Мізеса-Генки;
- $\Delta_{N_{2M2}}^{сep}$ – середнє арифметичне значення відносної похибки значень міцності за результатом експерименту та за теорією пластичності Губера-Мізеса-Генки;
- $\Delta_{N_{c\sigma}}$ – відносна похибка значень міцності за результатом експерименту та за теорією пластичності Сен-Венана;
- $\Delta_{N_{c\sigma},i}$ – кожне i -те значення відносної похибки значень міцності за результатом експерименту та за теорією пластичності Сен-Венана;
- $\Delta_{N_{c\sigma}}^{сep}$ – середнє арифметичне значення відносної похибки значень міцності за результатом експерименту та за теорією пластичності Сен-Венана;
- Δl_s – видовження сталевий оболонки;
- Δk – відносна похибка значень коефіцієнта «зміцнення» бетону;
- ε_c – відносне видовження бетонного осердя елемента;

ε_s – відносне видовження сталеві труби-оболонки в кільцевому напрямку;

ν – коефіцієнт Пуассона;

σ_0 – боковий тиск на бетон;

σ_{s1} – осьові напруження в стінках труби-оболонки;

σ_{s2} – кільцеві (меридіональні) напруження в стінках труби-оболонки.

ВСТУП

Актуальність теми. Шляхом критичного аналізу сучасного стану науково-технічних досягнень у межах кола питань роботи сталезалізобетонних конструкцій, було визначено, що, незважаючи на велику кількість уже проведених досліджень, на цей час наявною також є значна кількість ще не вирішених суперечностей в питаннях, що стосуються спільної роботи металеві труби та бетонного осердя сталезалізобетонних елементів. Цілком зрозуміло, що розв'язання цих питань слугувало б вагомим внеском у вдосконалення існуючих методів аналізу міцності трубобетонних елементів та вплинуло б на подальший розвиток їх застосування в сфері будівництва. Тож, існуюча проблема є достатньо актуальною, а виконання даної роботи є доцільним для розвитку науки та виробництва будівельної галузі.

Зв'язок роботи з науковим напрямом кафедри. Процес виконання магістерської роботи на кафедрі будівельних конструкцій заснований на новітніх досягненнях в галузі як проектування, так і наукових досліджень будівельних конструкцій. Дана робота пов'язана з такими напрямками тематики магістерських робіт, що виконуються магістрантами кафедри будівельних конструкцій, як, наприклад, «Дослідження напружено-деформованого стану та впровадження у будівництво сталезалізобетонних конструкцій» та «Дослідження трубобетонних конструкцій» [3].

Об'єкт дослідження – стискання трубобетонного елемента.

Предмет дослідження – міцність бетонного осердя трубобетонного елемента при його стисканні.

Мета і задачі роботи. Виходячи з обраних об'єкта та предмета, головну мету роботи сформульовано як дослідження міцності бетону трубобетонного елемента при стисканні та розробка методики розрахунку міцності нормального перерізу трубобетонного елемента з урахуванням явища «зміцнення» бетону осердя.

Задачі, котрі необхідно розв'язати для досягнення поставленої мети:

- виконати огляд літератури за обраним напрямом роботи;

- систематизувати дані щодо галузей застосування сталезалізобетонних конструкцій;
- вивчити основні нормативні положення з проектування сталезалізобетонних конструкцій;
- проаналізувати наукові дослідження щодо стану розрахунків трубобетонних конструкцій;
- ознайомитись з теоріями, що були застосовані в дослідженнях різних авторів;
- зробити висновки щодо недоліків існуючих теорій розрахунку міцності трубобетонних елементів;
- обрати розрахункову схему та передумови для реалізації власних досліджень;
- вивести розрахункові формули для визначення міцності нормального перерізу трубобетонного елемента;
- розробити методика розрахунку міцності нормального перерізу трубобетонного елемента на основі виведених розрахункових залежностей;
- виконати розрахунок за розробленою методикою, аби перевірити можливість її застосування та складність використання;
- отримати результати експериментальних досліджень, необхідні для оцінювання можливості застосування розробленої методики на практиці;
- проаналізувати всі результати проведених досліджень міцності бетону трубобетонного елемента при стисканні;
- сформулювати остаточні висновки за роботою.

Методи досліджень, які застосовуються в роботі. В ході виконання дипломної магістерської роботи було застосовано такі загальнонаукові методи дослідження, як емпіричні (було проведено опис експерименту та вимірювань) та теоретичні, котрі включають в себе аналіз, узагальнення, та пояснення.

Наукова новизна одержаних результатів. Вперше було одержано розрахункові залежності, які враховують явище підвищення міцності трубобетонного елемента за рахунок роботи бетону в умовах об'ємного напружено-деформованого стану, що було виражено за допомогою введення коефіцієнта «зміцнення» бетону при осьовому стисненні з урахуванням меридіонального тиску бетону на трубу та осьових напружень в ньому. Залежності, які використовувалися раніше, не враховували описане явище, через що отримані за ними значення міцності нормального перерізу трубобетонного елемента були неточними.

Зважаючи на одержані залежності, подальшого розвитку дістала також методика розрахунку міцності нормального перерізу таких елементів.

Практичне значення одержаних результатів. Зважаючи на той факт, що на момент написання роботи не існувало методик розрахунку, котрі давали б можливість враховувати такий граничний стан трубобетонних конструкцій, коли бетон і сталь руйнувалися б одночасно, високу практичну важливість має впровадження методики розрахунку міцності нормального перерізу трубобетонного елемента за виведеними у цій магістерській роботі формулами міцності.

Особистий внесок магістранта. Особисто магістранткою було отримано аналітичні вирази для розрахунку коефіцієнта «зміцнення» бетону осердя трубобетонного елемента в граничному стані на базі теорій пластичності Сен-Венана і Губера-Мізеса-Генки та рівняння міцності цього елемента, яке дозволяє використовувати міцність матеріалів повністю. Також власноруч було проведено розрахунки за виведеними виразами із подальшим порівнянням обчислених значень як коефіцієнта «зміцнення» бетону, так і міцності нормального перерізу за обома застосованими теоріями пластичності.

Магістранткою було порівняно значення міцності, одержані в ході розрахунків, із аналогічними експериментальними значеннями та зроблені відповідні висновки щодо можливості застосування отриманих розрахункових залежностей в подальшому, а також точності цих розрахунків.

Написанню магістерської роботи передувала низка наукових публікацій, де було частково викладено результати досліджень, проведених магістранткою.

Тези на тему «Коефіцієнт зміцнення трубобетонних елементів на основі умов пластичності» [4], опубліковані в Збірнику матеріалів III Міжнародної азербайджансько-української науково-практичної конференції «BUILDING INNOVATIONS – 2020» (1 – 2 червня 2020 року), відображають інформацію стосовно виведення авторкою виразів для обчислення значень коефіцієнта «зміцнення» бетонного осердя за теоріями пластичності Сен-Венана та Губера-Мізеса-Генки.

У статті «Дослідження роботи залізобетону в замкнутому просторі металевої труби» [5], розміщеній у Збірнику наукових праць за матеріалами XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Академічна й університетська наука: результати та перспективи» (10 – 11 грудня 2020 року), авторами, серед яких і магістранка, було запропоновано вираз для розрахунку значень міцності нормального перерізу трубобетонного елемента, який містив в собі коефіцієнт «зміцнення» бетону, а також формули для знаходження значення самого коефіцієнта «зміцнення».

Аналогічні наукові здобутки також було оприлюднено в тезах під назвою «Аналіз міцності залізобетону в замкнутому просторі металевої труби при стисканні» [6] у першому томі Збірника матеріалів 73-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів (21 квітня – 13 травня 2021 року).

Магістранткою було сформовано її дослідження в якості студентської наукової роботи на тему «Аналіз міцності залізобетону в замкнутому просторі металевої труби» [7] для участі у Всеукраїнському конкурсі студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей у 2020/2021 навчальному році, де авторка успішно захистила свою роботу та здобула диплом III ступеня (додаток Б).

Також результати проведених магістранткою досліджень було викладено в статті «Strength analysis of reinforced concrete in a closed space of a metal pipe» [8], яка ввійшла до Збірника наукових праць «Галузеве машинобудування, будівництво». В даній статті опис наукових розробок викладений англійською з метою популяризації отриманих знань серед закордонних науковців.

Із використанням отриманої в результаті написання роботи методики розрахунку міцності трубобетонних конструкцій магістранткою в рамках проведення конкурсу STEEL FREEDOM 2021 було запроєктовано трубобетонні колони для проекту С-955 культурного центру у м. Київ [9], котрий успішно увійшов до півфіналу конкурсу (додаток В). Це доводить можливість застосування запропонованої методики на практиці.

Апробація результатів роботи. Результати проведених досліджень, які викладено у магістерській роботі, доповідались на таких наукових конференціях, як:

- III Міжнародної азербайджансько-української науково-практичної конференції «BUILDING INNOVATIONS – 2020» (1 – 2 червня 2020 року);
- XIII Міжнародна науково-практична конференція «Академічна й університетська наука: результати та перспективи» (10 – 11 грудня 2020 року);
- 73-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів (21 квітня – 13 травня 2021 року).

Додатково матеріали досліджень було представлено в ході захисту студентських наукових робіт у II турі Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей у 2020/2021 навчальному році, де було здобуто диплом III ступеня (додаток Б).

В рамках проведення конкурсу STEEL FREEDOM 2021 було представлено проект С-955 культурного центру, який увійшов до півфіналу (додаток В), для якого трубобетонні колони було розраховано за розробленою у цій магістерській роботі методикою.

Публікації. Наукові результати магістерської роботи відображають 2 статті, 2 тез конференцій, 1 студентська наукова робота та 1 проект конкурсу STEEL FREEDOM 2021.

Об'єм роботи. Пояснювальна записка складається із титульного аркуша, змісту, переліку умовних позначень, вступу, основної частини, висновків та

рекомендацій за результатами досліджень, списку використаних джерел та додатку. Вона викладена на 92 сторінках, включаючи 68 сторінок основної частини, 5 сторінок списку використаних джерел та 7 сторінок додатків. Загальна кількість літературних джерел у списку становить 54. Текст основної частини містить 26 рисунків та 7 таблиць.

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

За нормами [10] терміном «сталезалізобетонна конструкція» позначено комбінований елемент із бетону чи залізобетону і конструкційної або холодноформованої профільної сталі, об'єднаних за допомогою з'єднань, що працюють на зсув і виключають можливість поздовжнього ковзання між бетоном і сталлю та відшарування компонентів між собою.

1.1. Галузі застосування трубобетонних конструкцій

Неперервного вдосконалення зазнають всі види несучих конструкцій будівель. Вони змінюються з плином часу, технічним прогресом та по мірі впровадження інноваційних технік, технологій і різноманітних методик.

Частіше за все конструкції покращуються завдяки винайденню рішень, які дозволили б подолати різного роду суперечності. Прикладом стимулювання розвитку конструктивних рішень в одному з напрямків є вічна проблема необхідності перекривати все більші прольоти. Також нові підходи до конструювання мають враховувати потребу сприйняття елементами навантажень, що зростають, паралельно із потребою мінімізувати власну вагу цих елементів. Додатково в реаліях нашого часу, коли увага всього світу прикута до питань енергоефективності, а також звертаючи увагу на загальнолюдське одвічне прагнення економії, обов'язковим є зменшення енерговитрат та трудомісткості під час виготовлення та монтажу конструкцій, що використовуються.

Значну кількість із цих вимог задовольняють трубобетонні елементи. Адже цей матеріал придатний до формування багатьох конструкцій із різноманітними формами поперечних перерізів [11]. Зауважимо, що бетон у складі трубобетонного елемента за рахунок роботи в умовах об'ємного напружено-деформованого стану здатний сприймати навантаження більші за його несучу здатність при самотійній роботі. Звідси випливає висновок, що бетон у трубобетонних конструкціях застосовується більш ефективно, ніж у простих бетонних.

Сталезалізобетонні конструкції можуть бути використані у багатьох галузях будівництва. Розглядуваний матеріал знайшов своє місце як у промисловому та цивільному будівництві, так і в мостобудуванні [12], машинобудуванні [13] та інших напрямках інженерної справи.

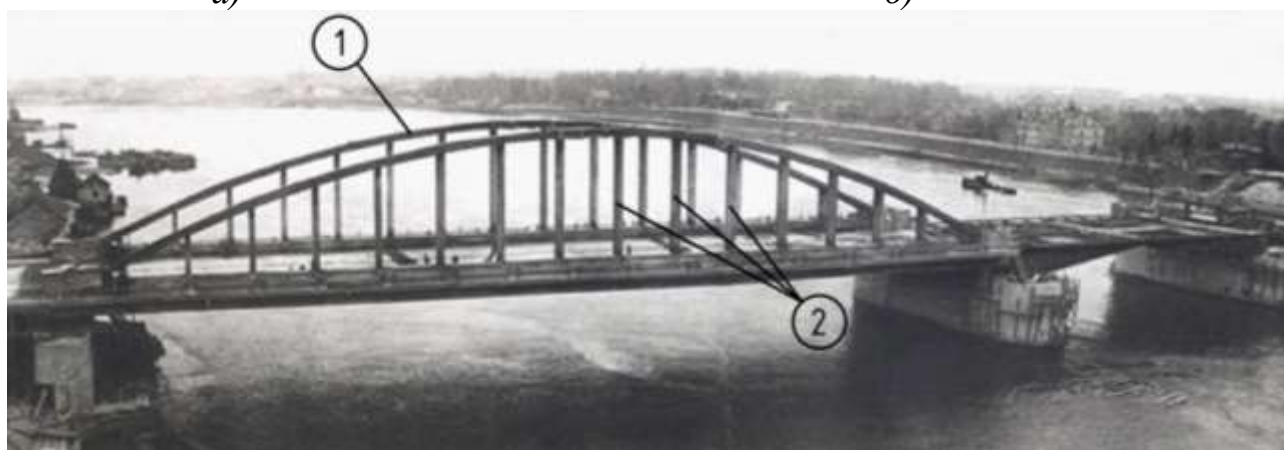
Прикладом застосування трубобетонних елементів у галузі мостобудування слугував Володарський міст (рис. 1.1) прольотом 101 м через р. Нева (Санкт-Петербург), зведений у 1936 році під керівництвом академіка Г.П. Передерія.



а)



б)



в)

Рисунок 1.1 – Старий Володарський міст через р. Нева, побудований із застосуванням трубобетонних елементів:

а) <http://go.microsoft.com/fwlink/p/?LinkId=255141>; б) <https://pastvu.com/p/525866>; в) https://funart.pro/uploads/posts/2021-04/1618787663_41-funart_pro-p-starii-volodarskii-most-krasivie-mesta-fot-41.jpg;

1 – верхній параболічний пояс з трубобетону; 2 – стійки безрозкісної ферми

Для цієї споруди було застосовано схему безрозкісної ферми. Великогабаритний пакет з 40 труб (рис. 1.1, в, поз. 1) діаметром 140×5 мм було використано як верхній параболічний пояс (рис. 1.2). Згодом конструкцію моста було замінено і система пакетного трубобетону не використовувалась через складність його виготовлення.

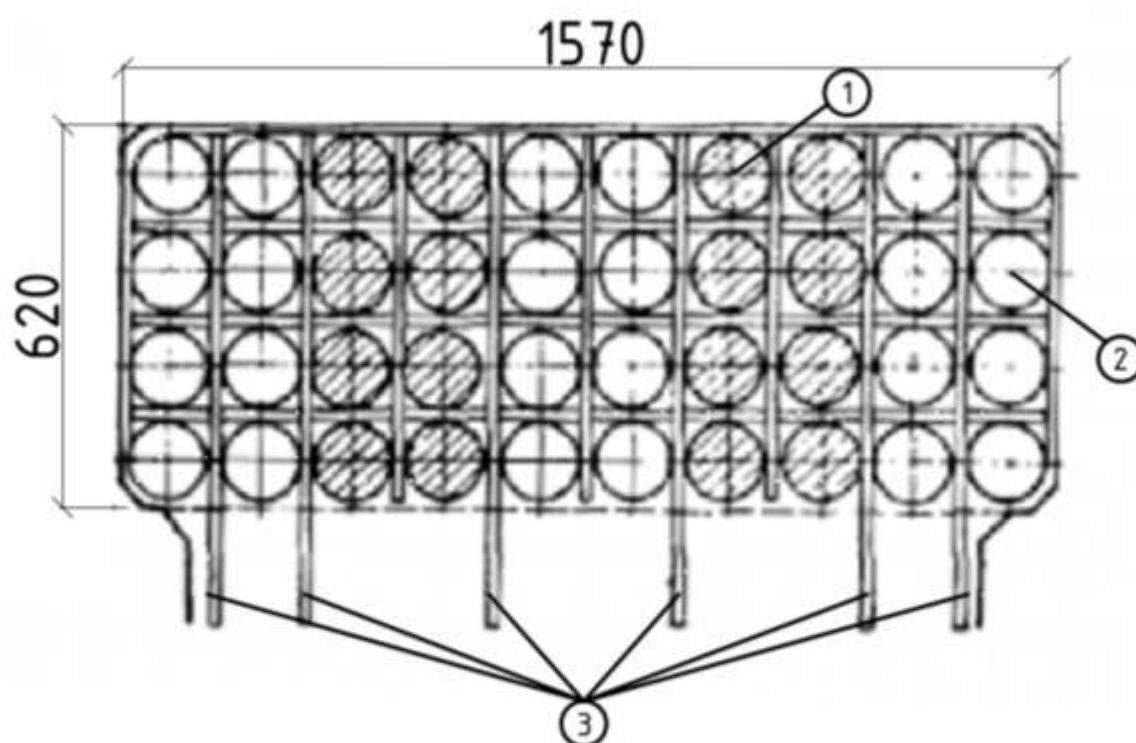


Рисунок 1.2 – Поперечний переріз верхнього параболічного поясу трубобетонного мосту ([12], стор. 47):

1 – трубобетонний елемент; 2 – труба; 3 – елементи кріплення верхнього поясу ферми до стійки

Вражаючим прикладом використання трубобетону в якості несучих конструкцій при зведенні споруд є вежа в Гуанчжоу (Китай), висота якої складає 610 м (рис. 1.3). До висоти 450 метрів башта зведена у вигляді комбінації гіперболоїдної несучої сітчастої оболонки і центрального ядра. Основу телевежі становить бетонна еліптична шахта з діаметрами 15,6 і 18,6 м відповідно. Гіперболоїдна конструкція сітчастої оболонки телевежі Гуанчжоу відповідає патенту 1899 року російського інженера В.Г. Шухова.



а)



б)



в)

Рисунок 1.3 – Телевізійна вежа з трубобетонних елементів, Гуанчжоу (Китай):
 а) загальний вигляд ([https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/04/Guangzhou Tower.jpg/1200px-Guangzhou Tower.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/04/Guangzhou_Tower.jpg/1200px-Guangzhou_Tower.jpg)); б) верхня частина вежі (<https://all-towers.ru/media/djmediatools/cache/4170-canton-tower/768x0-towidth-100-canton-tower11-768x937.jpg>); в) конструкція вежі (<https://lifeglobe.net/x/entry/0/cantontowerguangdong.jpg>);
 1 – трубобетонні колони; 2 – овальні кільця

Каркас будівлі складається з 24 трубобетонних колон (рис. 1.3, в, поз. 1) і серії з 46 овальних кілець (рис. 1.3, в, поз. 2) різного розміру, направлених в одну сторону по всій довжині конструкції [14]. Більш як 40 000 тон конструкційної сталі (в тому числі для щогли) було використано для проекту. Форма башти створюється двома еліпсами, один з яких знаходиться на рівні фундаменту, а інший на уявній горизонтальній площині, на висоті трохи вище 450 м.

Представлений об'єкт було зведено протягом 2005-2009 років компанією ARUP (рис. 1.4). Вежа призначена для трансляції ТВ і радіосигналів, а також для огляду панорами Гуанчжоу і розрахована на прийом 10 000 туристів на день.

Якщо ж звернути увагу на галузь цивільного будівництва, то неможливо залишити без уваги башту (рис. 1.5) в Тайбеї, столиці Тайваню. Там застосовані комбіновані сталезалізобетонні несучі конструкції, а загальна висота її складає 508 м. В якості основних колон використано 4 пари зварних металевих коробів перетином $2,4 \times 3,0$ м, заповнені бетоном (рис. 1.5, б, поз. 1). Кожна з колон розрахована на навантаження приблизно в 38 тис. т. Для підвищення міцності конструкції будівлі каркас містить 16 додаткових колон (рис. 1.5, б, поз. 2).



а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.4 – Будівництво телевежі із застосуванням сталезалізобетону в Гуанчжоу (Китай):

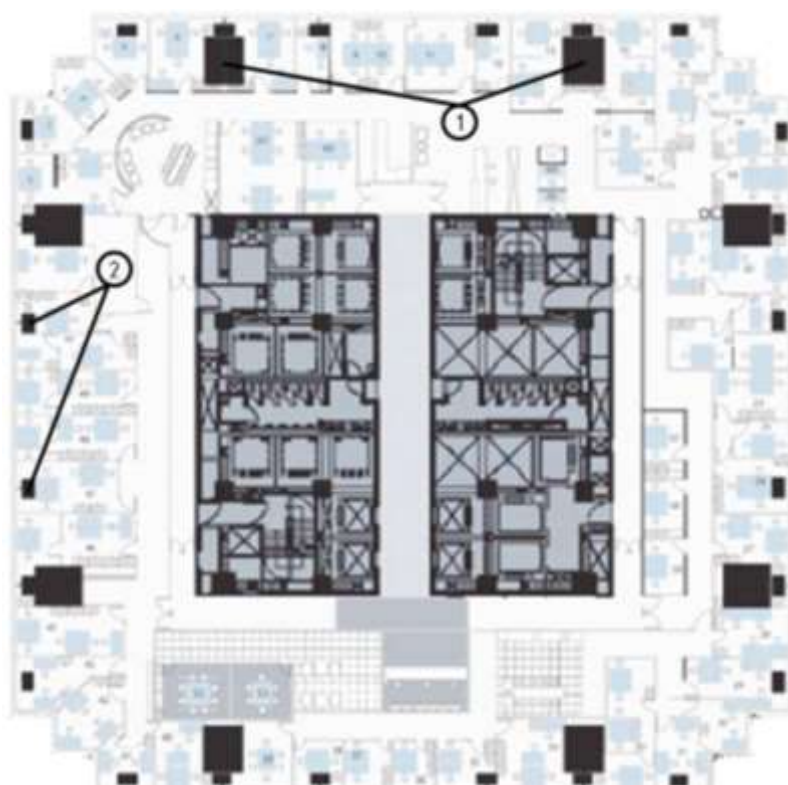
а) початок будівництва (<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/af/GZTVtower2.jpg>);

б) червень 2007 р. (<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/43/Guangzhou Tower2007.jpg/800px-Guangzhou Tower2007.jpg>); в) листопад 2007 р.

(<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d6/Hyperboloid Shuckhov Tower in Guangzhou during construction.jpg>); г) жовтень 2008 р. (<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/f0/Guangzhou Tower2008.jpg/800px-Guangzhou Tower2008.jpg>)



а)



б)

Рисунок 1.5 – Висотна будівля Тайбей 101 з комбінованими сталезалізобетонними несучими конструкціями в Тайвані (Китай):

а - загальний вигляд (https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/7e/Sun_Down_%28250260941%29.jpeg/1200px-Sun_Down_%28250260941%29.jpeg); б - план поверху (<https://mathpickle.com/wp-content/uploads/2016/10/Zeng-Proofs.002.jpeg>);

1 – основні колони з трубобетону; 2 – додаткові колони

Представником застосування сталезалізобетону в промисловій галузі будівництва є виробнича будівля відомої німецької фірми Зіменс, розташована в Берліні (рис. 1.6) [15]. Висота даної будівлі складає майже 22 м, а її сітка колон має крок рівний 14,4 м. Переkritтя було розраховане на корисне навантаження до 30 кН/м^2 . Основу каркаса становлять несучі колони, які складаються із труб діаметром 910 мм і товщиною стінки 12,5 мм, виготовлених із сталі St 37-2 та заповнених бетоном класу В45. Завершують конструкцію ригелі каркаса, що представляють собою сталеві профілі HEA 300, 600 з бетоном у стиснутій зоні.

Особливо вдало в цьому випадку вирішена конструкція вузлів з'єднання круглих трубобетонних колон з двотавровими ригелями. Адже для реалізації цього з'єднання було прийняте рішення щодо використання вставки із труби квадратного перерізу, заповненої бетоном. Дана заміна перерізів суттєво полегшила процес виконання такого, здавалося б, складного з'єднання.



Рисунок 1.6 – Сталезалізобетонний каркас багатоповерхової виробничої будівлі фірми Зіменс, м. Берлін ([15], стор. 49)

Що ж стосується застосування трубобетонних конструкцій в Україні, то в цій галузі успішно працює дніпровська компанія «Созидатель», яка звела за цією технологією багато таких будівель, як, наприклад, АЖК «Аркадієвська вежа» (рис. 1.7) і АЖК «Дніпровський» (рис. 1.8).

Трубобетонний каркас АЖК «Аркадієвська вежа» не лише залишає місце для польоту фантазії дизайнерів, а й робить можливим використання максимально просторих приміщень великої площі [16]. Також актуальним є рішення розробників

проекту щодо розташування квартир в двох рівнях. Згаданий адміністративно-житловий комплекс налічує 16 поверхів, 63 квартири, торгово-офісні площі і упорядкований внутрішній двір.

Технологічні рішення цього проекту широко застосовуються в Європі і США та не мають аналогів в Україні.



Рисунок 1.7 – Будівля з трубобетонних конструкцій адміністративно-житлового комплексу (АЖК) «Аркадієвська вежа» (Україна) (https://sozidatel.dp.ua/wp-content/uploads/2020/02/117_large-300x203.jpg)

Адміністративно-житловий комплекс «Дніпровський» зданий в експлуатацію в 2007 році. Це унікальний проект в сучасному плані забудови вулиць Баумана і Дем'яна Бедного [17].

Два сімнадцятиповерхових житлових будинки циліндричної форми об'єднані стилобатом, в якому розміщено триповерховий адміністративно-торгівельний центр. Разом вони формують архітектурно-просторову композицію, підпорядковану загальної сюжетної лінії міської забудови. Проект підтримує тенденцію підвищення поверховості району Нового моста у Дніпрі.

Суворі геометричні форми вертикалей фасадів і вітражне скло підкреслюють архітектурну виразність проекту. Технічне рішення комплексу формується із

застосуванням новітніх технологій будівництва, систем автономного теплопостачання та сучасного інженерного обладнання.

Три рівні стилобату і два нижні поверхи житлових секцій, відведені просторим і світлим магазинам, офісах, тренажерним залам, кафе і клубам. З третього по сімнадцятий поверх в ЖК «Дніпровському» розміщені комфортабельні квартири.



а)



б)

Рисунок 1.8 – Будівлі адміністративно-житлового комплексу (АЖК) «Дніпровський» із трубобетонним каркасом:

а) загальний вигляд (https://sozidatel.dp.ua/wp-content/uploads/2020/02/533_large.jpg); б) зведення з використанням трубобетонного каркасу ([12], стор. 51-52)

Окремо слід виділити таку галузь застосування сталезалізобетонних елементів, як реконструкцію будівельних об'єктів [18]. В цьому напрямку розглядувані конструкції за рахунок високої технологічності дозволяють в рази знизити трудомісткість і виконати роботи в обмежених умовах.

На рис. 1.9 наведено приклад використання перекриття пониженої висоти в умовах реконструкції будівлі. Перекриття зі сталезалізобетону являє собою конструкцію, в якій сталеві профільовані листи спочатку використовуються в якості незнімної опалубки, а потім завдяки застосуванню анкерних пристроїв починають працювати спільно з бетоном в якості зовнішньої розтягнутої арматури (рис. 1.10).



Рисунок 1.9 – Приклад використання сталезалізобетонного перекриття пониженої висоти при реконструкції будівлі ([18], стор. 12)

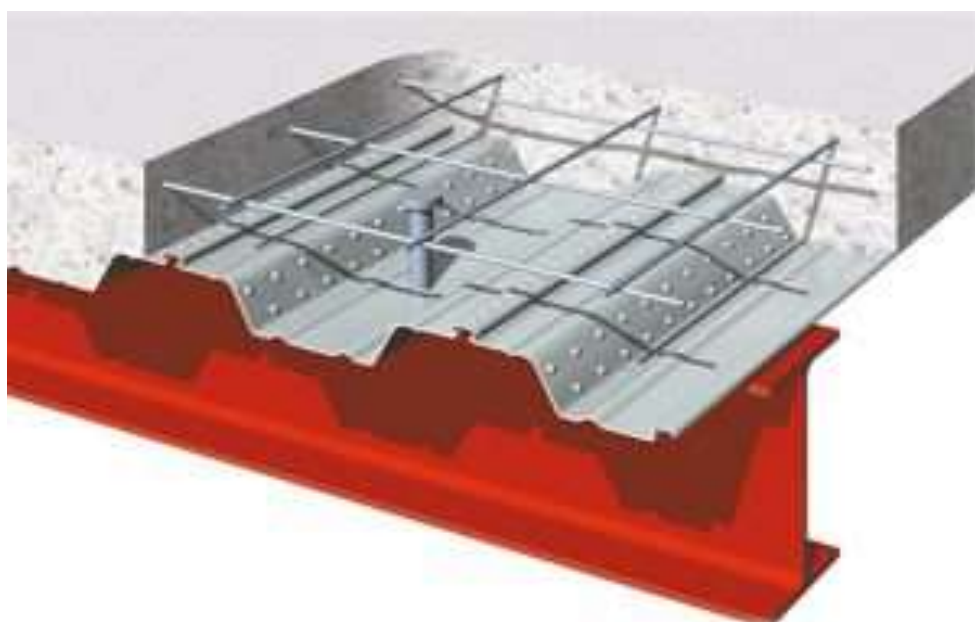


Рисунок 1.10 – Конструкція сталезалізобетонного перекриття (https://rautagroup.com/wp-content/uploads/2017/03/frame_composite_1-300x200.jpg)

Таким чином стає зрозуміло, що сталезалізобетонні конструкції дійсно можуть успішно використовуватися в багатьох галузях будівництва.

1.2. Стан розрахунків трубобетонних конструкцій

Сталезалізобетонні стійки, які мають численні переваги, впевнено займають своє місце при зведенні багатьох варіацій як одно-, так і багатоповерхових будівель.

Нормування таких конструкцій в Україні здійснюється за ДБН В.2.6-160:2010 «Сталезалізобетонні конструкції. Основні положення» [10], де наведено типові перерізи комбінованих колон (рис. 1.11).

Не зайвим буде відмітити той факт, що у нормах [10] описано не всі можливі поперечні перерізи трубобетонних елементів так само, як і наведено неповний перелік параметрів, що впливають на визначення несучої здатності конструкцій [15]. Тобто набуває ясності необхідність подальшого поглиблення знань в цій галузі науки для вдосконалення нормативної бази, методик розрахунку та загального розвитку галузі будівництва України.

Численними науковими дослідженнями було виявлено, що з багатьох різних конфігурацій сталезалізобетонних елементів найефективнішими виявились конструкції з трубобетону, які складаються зі сталеві труби та бетонного осердя.

Найбільш розповсюджені поперечні перерізи трубобетонних елементів зображено на рис. 1.12, з якого можна сформулювати уявлення не лише щодо очевидного різноманіття форм колон з такого матеріалу, а й про найбільш розповсюджену форму перерізу трубобетонних елементів.

Що стосується проектування стиснутих трубобетонних елементів, то наразі цей процес має досить високу трудомісткість та складність. Досить важливою також є проблема проектування сталезалізобетонних елементів, яка полягає у відсутності конструктивних залежностей, які з точки зору об'ємного напружено-деформованого стану бетону чітко виділяють б компонент його зміцнення [4 – 5].

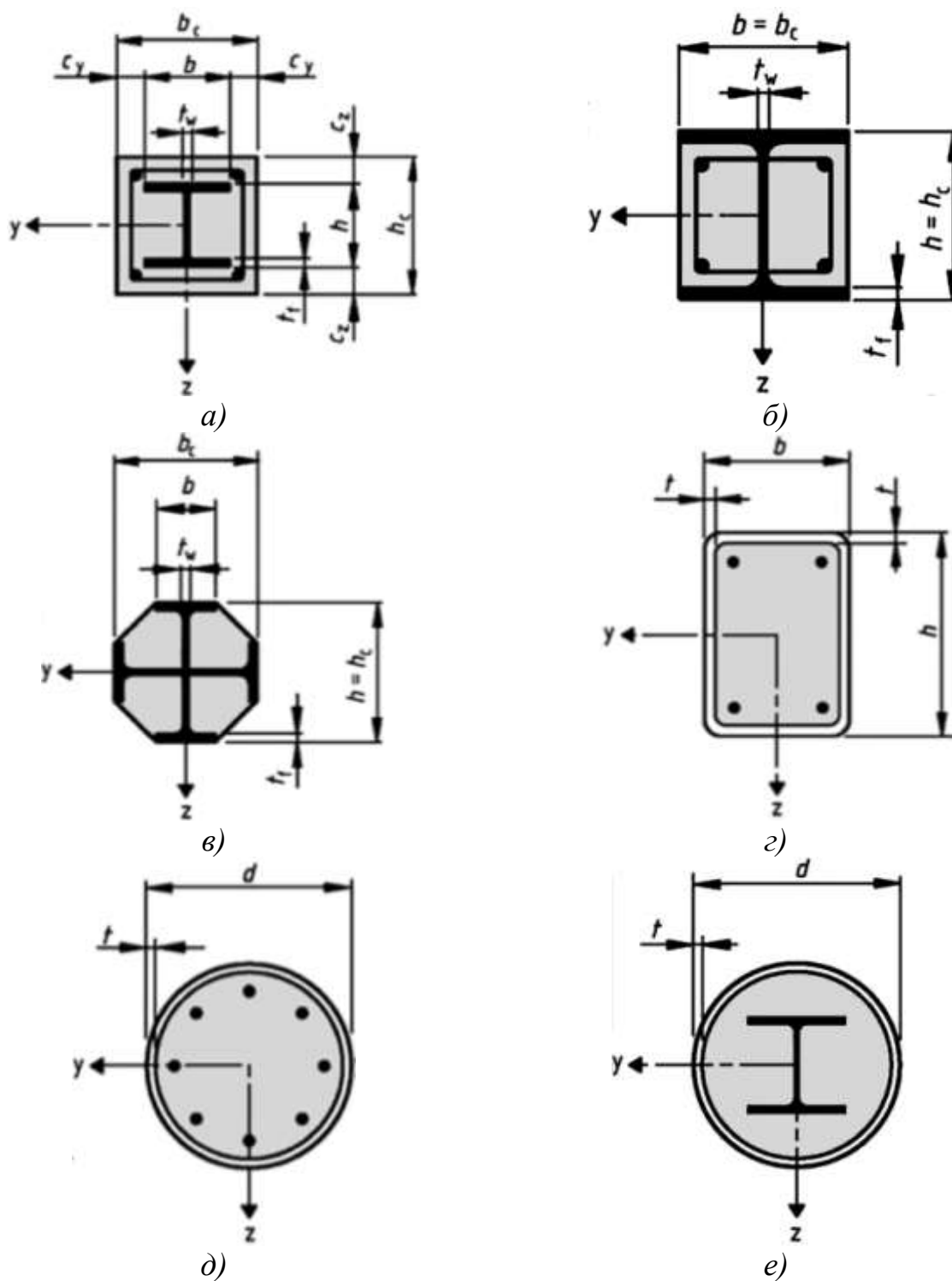


Рисунок 1.11 – Типові перерізи сталезалізобетонних колон ([10], стор. 40):
 а) переріз у квадратній трубі зі стержневою арматурою та двотавром; б) переріз, утворений двотавром, зі стержневою арматурою; в) восьмикутний переріз, утворений двома взаємоперпендикулярними двотаврами; г) переріз у прямокутній трубі зі стержневою арматурою; д) переріз у круглій трубі зі стержневою арматурою; е) переріз у круглій трубі з двотавром;

де t – товщина стінки труби; t_w – товщина стінки двотавра; t_f – товщина полицки двотавра; h – висота двотавра (для рис. г висота перерізу); h_c – висота перерізу; d – діаметр труби; b – ширина двотавра (для рис. г ширина перерізу); b_c – ширина перерізу; y та z – координатні вісі в площині перерізу

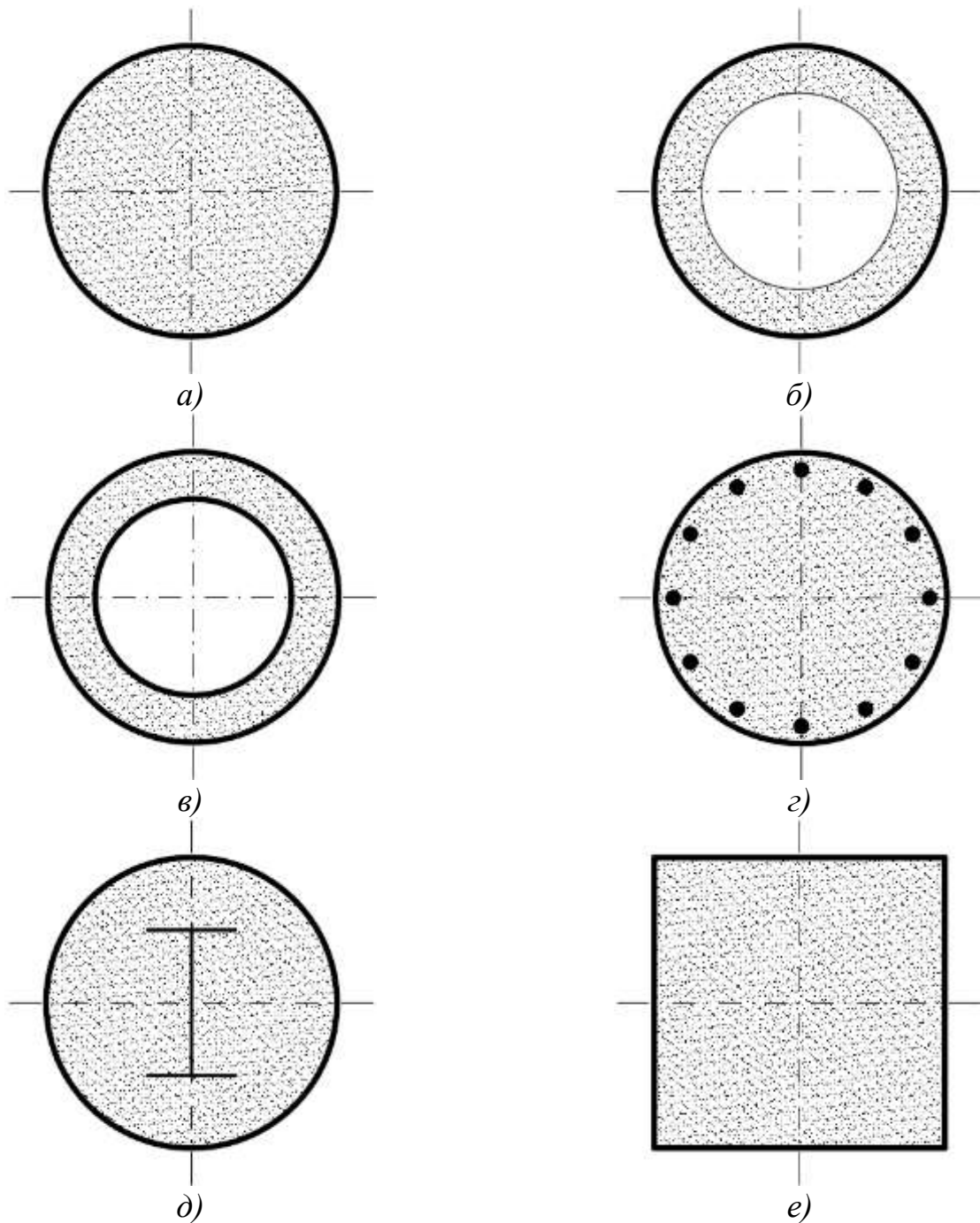


Рисунок 1.12 – Різноманіття трубобетонних колон ([15], стор. 31):

а) круглий переріз; б) центрифуговане бетонне ядро із трубою зовні; в) кільцевий переріз з двома обмежувачими трубами; г) круглий переріз, армований арматурними стержнями; д) круглий переріз, армований двотавром; е) квадратний переріз

Отже, якщо розглядати актуальний стан розрахунків трубобетонних конструкцій, то стає помітно, що без урахування згаданого вище явища зміцнення одержані розрахункові значення міцності нормального перерізу трубобетонного елемента будуть неточними [7].

Вирішення ж цього питання полягає у реалізації в майбутньому нових досліджень теорії розрахунків несучої здатності трубобетонних конструкцій, ґрунтуючись на сучасних поглядах на сумісну роботу армованого бетону осердя та сталеві труби-оболонки [19 – 25]. Адже для виключення цього негативного фактору раніше було запропоновано значну кількість емпіричних методів аналізу міцності стиснених трубобетонних елементів. Але такий підхід до питання мав свій недолік, який виражався у накопиченні емпіризму цих методів, що в свою чергу негативно впливало на поглиблення усвідомлення складної роботи конструкцій із трубобетонних елементів. Дослідження саме такого роду проводилися, публікувалися та знаходили своє відображення у нормативних документах Європи [26] та інших прогресивних країн таких, як, наприклад, Англія [27], Канада [28] та США [29 – 30].

Також проводилися численні дослідження такого питання проектування трубобетонних елементів, як спосіб прикладання зовнішнього навантаження. Один з випадків демонструє ситуацію, коли водночас завантажують і металеву трубу, і її бетонне осердя [31]. Інший же випадок описує процес прикладання навантаження лише на бетон, залишаючи його сталеву оболонку вільною від зовнішнього силового впливу [32]. Аналогічно не могли залишитися без уваги науковців і рівень адгезії на контакті «труба – бетон» та критерії руйнування елемента. Останні з яких мають два випадки: перший – при досягненні сталлю труби-оболонки напружень, які відповідають межі текучості; другий – стан повного руйнування трубобетонного елемента.

1.3. Теорії, які застосовано в дослідженнях

На даному етапі основні теорії, які застосовуються при розрахунках із врахуванням об'ємного напружено-деформованого стану бетонного осердя в дослідженнях стиснутих сталезалізобетонних стійок, умовно поділяються науковцями на дві групи [15]:

- із врахуванням підвищення міцності бетону шляхом збільшення призмової міцності до величини $R_b + k\sigma_0$, що дозволяє привести загальну розрахункову формулу до вигляду:

$$N \leq A_b(R_b + k\sigma_0) + A_sR_s, \quad (1.1)$$

де σ_0 – боковий тиск на бетон, а k – коефіцієнт ефективності бокового тиску;

- із врахуванням підвищення міцності матеріалів шляхом уведення коефіцієнтів ефективності, які змінюють загальну розрахункову формулу наступним чином:

$$N \leq \beta A_b R_b + \alpha A_s R_s, \quad (1.2)$$

де α, β – коефіцієнти ефективності роботи сталі та бетону відповідно.

1.4. Висновки за розділом 1

Вище наведений огляд літератури за тематикою магістерської роботи дав підстави для наступних висновків:

1. Як сталезалізобетонні загалом, так і трубобетонні конструкції зокрема мають значну кількість різноманітних галузей застосування у будівництві, що зумовлює необхідність подальшого розвитку методик їх розрахунку та проектування.
2. Велика кількість питань, які стосуються реалізації розрахунків міцності трубобетонних елементів, залишається не вирішеною, тому проведення досліджень в рамках магістерської роботи за обраною темою є актуальним в розрізі вирішення проблеми вдосконалення існуючих методів розрахунку міцності нормального перерізу трубобетонних конструкцій.

3. Стан розрахунків трубобетонних конструкцій на цей час є задовільним для проектування, але формули, які рекомендуються для проведення розрахунків несучої здатності елементів, не дають можливості використовувати міцність матеріалів повністю.
4. Теорії, які наразі застосовуються в дослідженнях, не є досконалими та певною мірою ускладнюють процес проведення розрахунку міцності трубобетонних конструкцій, тобто роблять його більш трудомістким.
5. На сьогодні не існує досліджень, результатами яких стали методики розрахунку, котрі давали б можливість враховувати такий граничний стан трубобетонних конструкцій, за умови настання якого бетон і сталь руйнувалися б одночасно. Відповідно відсутні також і розрахункові схеми для проведення таких обчислень. Тож, високу практичну важливість мало б розроблення розрахункової схеми, визначення передумов, виведення формул та впровадження методики розрахунку міцності нормального перерізу трубобетонного елемента, де було б враховано саме такий граничний стан.

2. РОЗРАХУНОК МІЦНОСТІ НОРМАЛЬНОГО ПЕРЕРІЗУ ТРУБОБЕТОННОГО ЕЛЕМЕНТА

Для проведення розрахунку міцності нормального перерізу трубобетонного елемента необхідно, перш за все, обрати передумови розрахунку, які будуть застосовані, та на їх основі розробити розрахункову схему. Після визначення цих даних стає можливим виведення розрахункових формул на їх основі. Наступною буде сформована методика розрахунку міцності нормального перерізу трубобетонного елемента за виведеними математичними виразами. А останнім кроком цього етапу дослідження стане аналіз прикладів розрахунку міцності, реалізованих за розробленою раніше методикою.

2.1. Постулати та розрахункова схема

Аби реалізація розрахунку міцності нормального перерізу трубобетонного елемента стала можливою, було обрано наступні постулати:

- закон розподілу деформацій бетону та сталі по висоті нормального перерізу приймається лінійним;
- деформації бетону осердя приймаються рівними деформаціям сталевій труби, тож в будь-якій точці довільного перерізу переміщення бетону u_c дорівнюватимуть за величиною деформаціям труби u_s , тобто $u_s = u_c$ [7];
- за критерій руйнування трубобетонного елемента приймається другий граничний стан його роботи [33], тобто такий граничний стан, котрий характеризується досягненням напружень текучості сталлю оболонки розглядуваного елемента та руйнуванням бетону.

Розрахункову схему було обрано на основі найбільш поширеного перерізу трубобетонних колон. З наведеного вище рисунку 1.12 (п. 1.2) видно, що частіше використовуються елементи, які складаються з круглої сталевій труби, заповненої бетоном. Тож, зосередимо свою увагу саме на такій конфігурації трубобетонної стійки, обравши для подальшого дослідження її частину мінімальної товщини $dz = 1$.

Продемонструємо розрахункову схему визначеного перерізу нижче (рис. 2.1).

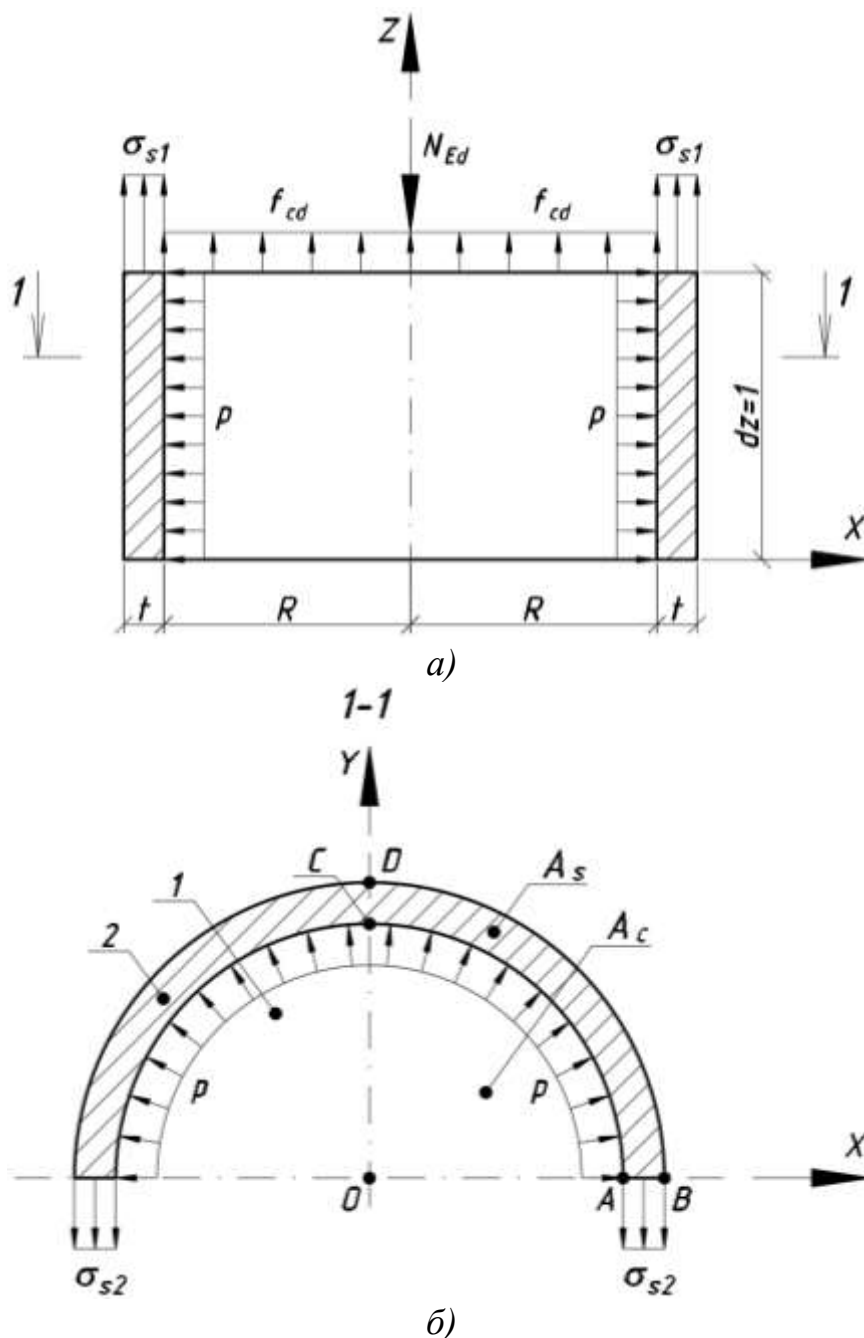


Рисунок 2.1 – Розрахункова схема напруженого стану трубобетонної колони круглого перерізу ([8], стор. 27):

- а) поздовжній переріз трубобетонного елемента; б) зображення елемента в перерізі 1-1;
 t – товщина стінки труби; R – радіус бетонного осердя; A_s – площа труби; A_c – площа бетонного осердя; A – точка контакту «труба-бетон» на осі X ; B – точка на зовнішній грані труби на осі X ; C – точка контакту «труба-бетон» на осі Y ; D – точка на зовнішній грані труби на осі Y ; O – точка центра перерізу; XOY – горизонтальна площина перерізу; Z – вертикальна вісь елемента;
 1 – бетонне осердя; 2 – сталева труба-оболонка

На рис. 2.1 показано зусилля: N_{Ed} – розрахункове значення зовнішнього прикладеного зусилля; σ_{s1} – осьові напруження в стінках труби-оболонки; σ_{s2} – кільцеві напруження в стінках труби-оболонки; f_{cd} – граничне значення напружень в бетоні в момент його руйнування; p – меридіональний тиск бетону на трубу.

Маючи чітко визначені передумови та повністю описану розрахункову схему для подальших дослідницьких вишукувань, переходимо до наступного етапу – виведення залежностей для розрахунку міцності нормального перерізу трубобетонної колони.

2.2. Виведення розрахункових формул

Отже, розглянемо колону обраного перерізу (рис. 2.1), яка являє собою циліндричний трубобетонний елемент, котрий знаходиться в процесі стискання.

Для розрахунку несучої здатності описаного елемента, зважаючи на необхідність враховувати як меридіональний тиск бетону на сталеву оболонку p , так і осьові напруження σ_{s1} в ній, вважається доцільним використання наступної залежності [6]:

$$N_{Ed} \leq N_{Rd} = A_c (f_{cd} + 4 \cdot p) + A_s \sigma_{s1}, \quad (2.1)$$

де N_{Ed} – розрахункове значення зовнішнього прикладеного зусилля; N_{Rd} – розрахункове значення опору дії зовнішнього прикладеного зусилля; A_c – площа бетонного осердя заданого перерізу; f_{cd} – граничне значення напружень у бетоні в момент його руйнування; A_s – площа сталеві труби-оболонки заданого перерізу.

Наведена нерівність (2.1) містить у своїй правій частині вже відомий вираз [34] для обчислення значення внутрішнього зусилля, яке виникає при дії прикладеного навантаження. Така формула застосовується досить давно, але не дозволяє повністю врахувати роботу труби в граничному стані в осьовому напрямку. Тож, значення осьових напружень σ_{s1} у виразі (2.1) можуть суттєво відрізнитися від граничних значень напружень сталеві оболонки трубобетонної колони f_{yd} при досягненні нею

граничного стану. Цей недолік стає причиною неповного використання матеріалів тому, що значення міцності нормального перерізу трубобетонного елемента, отримані на основі представленої формули, не співпадають із дійсними експериментальними значеннями, адже математичний вираз має максимально наближено відображати сутність фізичного процесу, котрий він описує. Цей факт обґрунтовує необхідність усунення фактору виникнення похибок при розрахунках та введення нових математичних залежностей, які б дозволяли застосовувати матеріали з повним використанням їх міцності.

Аби вивести такі залежності для розглядуваної частини елемента товщиною $dz = 1$ по висоті (рис. 2.1, п. 2.1), спочатку запишемо умову рівноваги перерізу, тобто математично виразимо рівність виникаючих кільцевих напружень оболонки σ_{s2} та меридіонального тиску бетону p , який спричиняє виникнення цих кільцевих напружень. Враховуючи, що величини σ_{s2} та p представлені у вигляді рівномірно розподіленого по деякій поверхні навантаження, помилковим було б рішення прирівняти їхні значення одне до одного. Розв'язання цієї проблеми полягає в застосуванні замість значень рівномірно розподілених навантажень значень рівнодійних цих навантажень (рис. 2.2).

Розглянемо більш детально дію кільцевих напружень σ_{s2} . Вони виникають по всій площі перерізу стінки труби обраної частини трубобетонного елемента, котра з метою полегшення сприйняття зображена на рисунку 2.2, *a* прямокутником $EFGH$. Геометричним центром цього прямокутника є точка K , місцезнаходження якої визначається перетином діагоналей прямокутника. При заміні рівномірно розподіленого навантаження його рівнодійною силою остання прикладається в центрі площини, на яку діє навантаження.

Тому дію рівномірно розподілених кільцевих напружень в трубі-оболонці σ_{s2} було замінено дією прикладеної в точці K (рис. 2.2, *a*) та спроектованої на вісь Y (рис. 2.2, *б*) рівнодійної сили $N_{\sigma_{s2}}$.

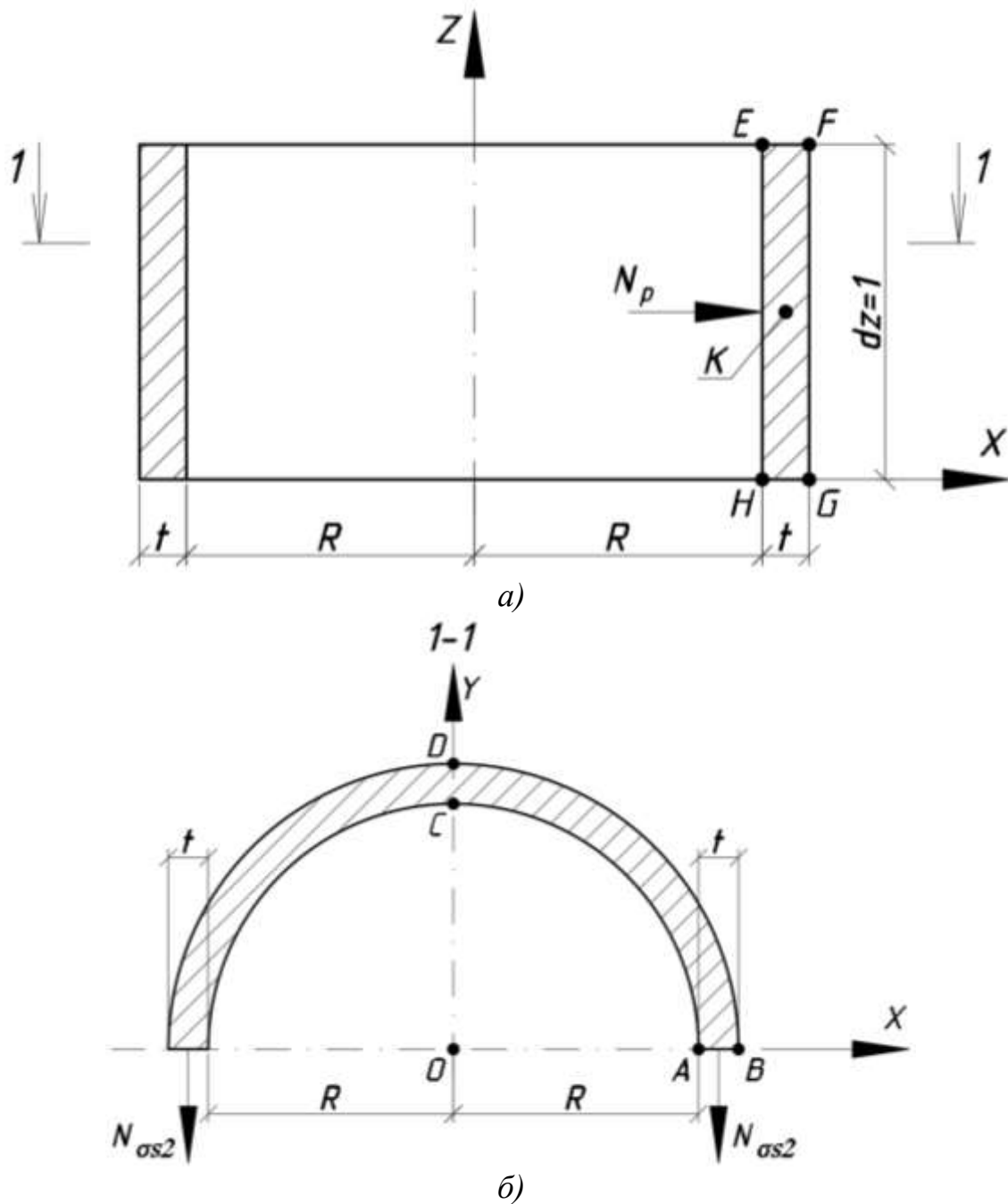


Рисунок 2.2 – Розрахункова схема нормального перерізу трубобетонної колони із прикладеними рівнодійними силами:

а) вертикальний переріз трубобетонного елемента; б) горизонтальний переріз 1-1;
 $N_{\sigma s2}$ – рівнодійна від розподіленого по стінці сталевій труби-оболонки кільцевого напруження σ_{s2} ; N_p – рівнодійна від розподіленого по внутрішній поверхні труби тиску бетону p ; t – товщина стінки труби; R – радіус бетонного осердя; XOY – горизонтальна площина перерізу; Z – вертикальна вісь елемента

Аналогічно було проведено заміну рівномірно розподіленого тиску бетону p на внутрішню поверхню сталевій труби на рівнодійну цього навантаження N_p , котру

прикладено на поверхні контакту «труба-бетон» по середині висоти досліджуваної частини трубобетонної колони.

Таким чином стає можливим складання рівняння рівноваги у вигляді:

$$N_{\sigma_{s2}} = N_p, \quad (2.2)$$

де $N_{\sigma_{s2}}$ – рівнодійна від розподіленого по стінці сталевій труби-оболонки кільцевого напруження σ_{s2} ; N_p – рівнодійна від розподіленого по внутрішній поверхні труби тиску бетону p .

Зважаючи на те, що значення рівнодійної сили $N_{\sigma_{s2}}$ обчислюється за формулою:

$$N_{\sigma_{s2}} = \sigma_{s2} \cdot A_s^0, \quad (2.3)$$

де A_s^0 – площа перерізу стінки сталевій труби, по котрій розподілені кільцеві напруження σ_{s2} .

За тією ж логікою значення рівнодійної сили N_p може бути розраховане із застосуванням виразу:

$$N_p = p \cdot A_c^0, \quad (2.4)$$

де A_c^0 – площа перерізу бетону, по котрій розподілений його меридіональний тиск p .

Якщо в рівнянні (2.2) обидві величини замінити виразами (2.3) та (2.4) для обчислення їхніх значень, то вихідне рівняння набуде форми:

$$\sigma_{s2} \cdot A_s^0 = p \cdot A_c^0. \quad (2.5)$$

Знаючи як визначаються необхідні площі, запишемо їхні рівняння. Площа перерізу стінки сталевій труби A_s^0 , по котрій розподілені кільцеві напруження σ_{s2} , є

площею прямокутника $EFGH$ (рис. 2.2, a), обчислюється як добуток його довжини на висоту:

$$A_s^0 = t \cdot dz; \quad (2.6)$$

Площа перерізу бетонного осердя A_c^0 , по котрій розподілений його меридіональний тиск p , на рис. 2.2, a також зображується в формі прямокутника, а отже:

$$A_c^0 = R \cdot dz. \quad (2.7)$$

Остаточний вираз для розрахунку значення рівнодійної сили $N_{\sigma_{s2}}$ представимо у вигляді (2.8) після застосування до рівняння (2.3) формули площі перерізу стінки сталеві труби A_s^0 (2.6).

$$N_{\sigma_{s2}} = \sigma_{s2} \cdot t \cdot dz. \quad (2.8)$$

В свою чергу, значення рівнодійної сили N_p від тиску бетону на трубу розраховуватиметься при уточненні виразу (2.4) формулою (2.7) як:

$$N_p = p \cdot R \cdot dz. \quad (2.9)$$

У результаті розкриття рівняння (2.2) на основі наведених вище виразів (2.8) і (2.9) для обчислення значення рівнодійних сил було отримано наступну формулу:

$$\sigma_{s2} \cdot t \cdot dz = p \cdot R \cdot dz. \quad (2.10)$$

Формула (2.10) є основою для виведення залежності, котра дозволяє розраховувати значення рівномірно розподіленого тиску p на внутрішню поверхню

сталевій труби. Знайдемо таку залежність шляхом вираження величини тиску бетону p з формули (2.10) та використання базових математичних перетворень:

$$p = \frac{\sigma_{s2} \cdot t}{R}. \quad (2.11)$$

Замінивши в правій частині нерівності (2.1) значення меридіонального тиску p на отриману формулу для його визначення (2.11), можна спостерігати за тим, як вираз для обчислення внутрішнього зусилля (2.1) набуде такого вигляду:

$$N_{Rd} = A_c \left(f_{cd} + 4 \cdot \frac{\sigma_{s2} \cdot t}{R} \right) + A_s \sigma_{s1}. \quad (2.12)$$

Не зайвим також буде навести формули обрахунку площі бетону A_c та площі сталевій труби A_s в нормальному перерізі циліндричного трубобетонного елемента (рис. 2.3):

$$A_s = 2\pi \cdot R \cdot t; \quad (2.13)$$

$$A_c = \pi \cdot R^2. \quad (2.14)$$

Звідси за допомогою простих математичних перетворень робимо висновок, що співвідношення цих площ дорівнює:

$$\frac{A_s}{2A_c} = \frac{t}{R}. \quad (2.15)$$

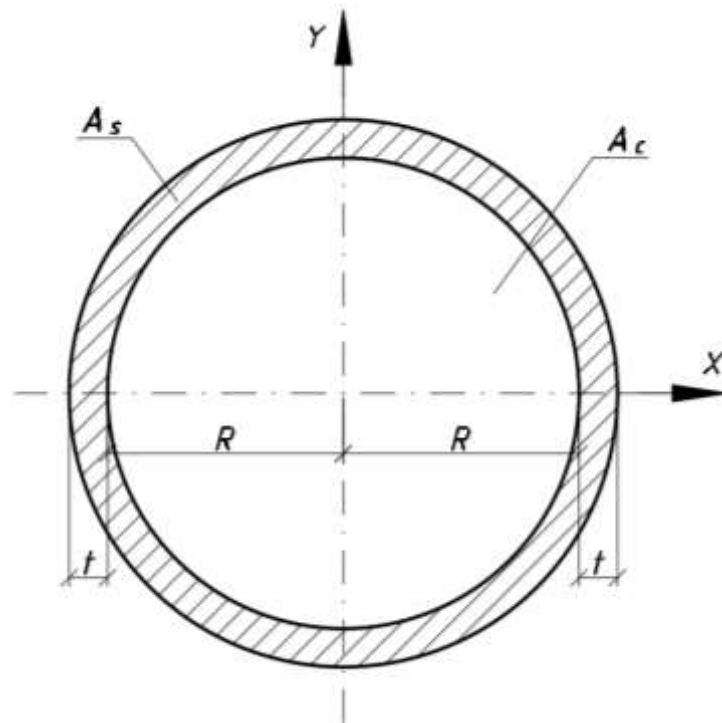


Рисунок 2.3 – Розрахункова схема нормального перерізу циліндричного трубобетонного елемента для визначення геометричних характеристик

Враховуючи отримане співвідношення площ (2.15), приведемо формулу (2.12) до виразу (2.16), аби в ній не фігурували такі геометричні характеристики перерізу, як товщина стінки труби t та радіус бетонного осердя R .

$$N_{Rd} = A_c f_{cd} + 2 \cdot \sigma_{s2} \cdot A_s + A_s \sigma_{s1}. \quad (2.16)$$

З метою подальшого вдосконалення отриманого виразу (2.16) було прийнято рішення про введення коефіцієнта k , котрий характеризуватиме співвідношення меридіональних (кільцевих) напружень σ_{s2} та осьових напружень σ_{s1} :

$$\frac{\sigma_{s2}}{\sigma_{s1}} = k. \quad (2.17)$$

Завдяки введеному коефіцієнту k осьові напруження сталеві труби-оболонки σ_{s1} можуть бути виражені через меридіональні напруження цієї самої труби σ_{s2} наступним чином:

$$\sigma_{s1} = \frac{\sigma_{s2}}{k}. \quad (2.18)$$

Аналогічно значення меридіональних напружень σ_{s2} пов'язується зі значенням осьових напружень σ_{s1} , що виражається залежністю:

$$\sigma_{s2} = k\sigma_{s1}. \quad (2.19)$$

Наведене позначення (2.19) та застосування базових математичних операцій дали можливість представити вираз (2.16) як формулу (2.20).

$$N_{Rd} = A_c f_{cd} + (2k + 1) A_s \sigma_{s1}. \quad (2.20)$$

Одержана формула (2.20), окрім відомих характеристик нормального перерізу циліндричного трубобетонного елемента, містить у собі дві невідомі величини: осьові напруження σ_{s1} та k – уведений коефіцієнт співвідношення меридіональних (кільцевих) напружень σ_{s2} та осьових напружень σ_{s1} . Зважаючи на взаємозв'язок цих трьох характеристик, можна стверджувати, що введений коефіцієнт k стане відомим після визначення величини кільцевих напружень σ_{s2} , котра досить просто знаходиться з умови рівності та сумісності деформацій сталеві оболонки та бетонного осердя в радіальному напрямку.

Як було зазначено в пункті 2.1 даної дослідницької роботи, однією з передумов розрахунку міцності нормального перерізу циліндричного трубобетонного елемента було обрано рівність деформації бетону осердя деформаціям сталеві труби-оболонки. Враховуючи таку особливість роботи розглядуваної частини трубобетонного елемента товщиною $dz = 1$, було сформульовано рівність переміщень сталеві оболонки u_s та бетону u_c в точці А чи довільній іншій точці нормального перерізу (рис. 2.4, б), яка знаходилася б на внутрішній стороні сталеві оболонки в місці її контакту з бетоном, таким чином:

$$u_s = u_c. \quad (2.21)$$

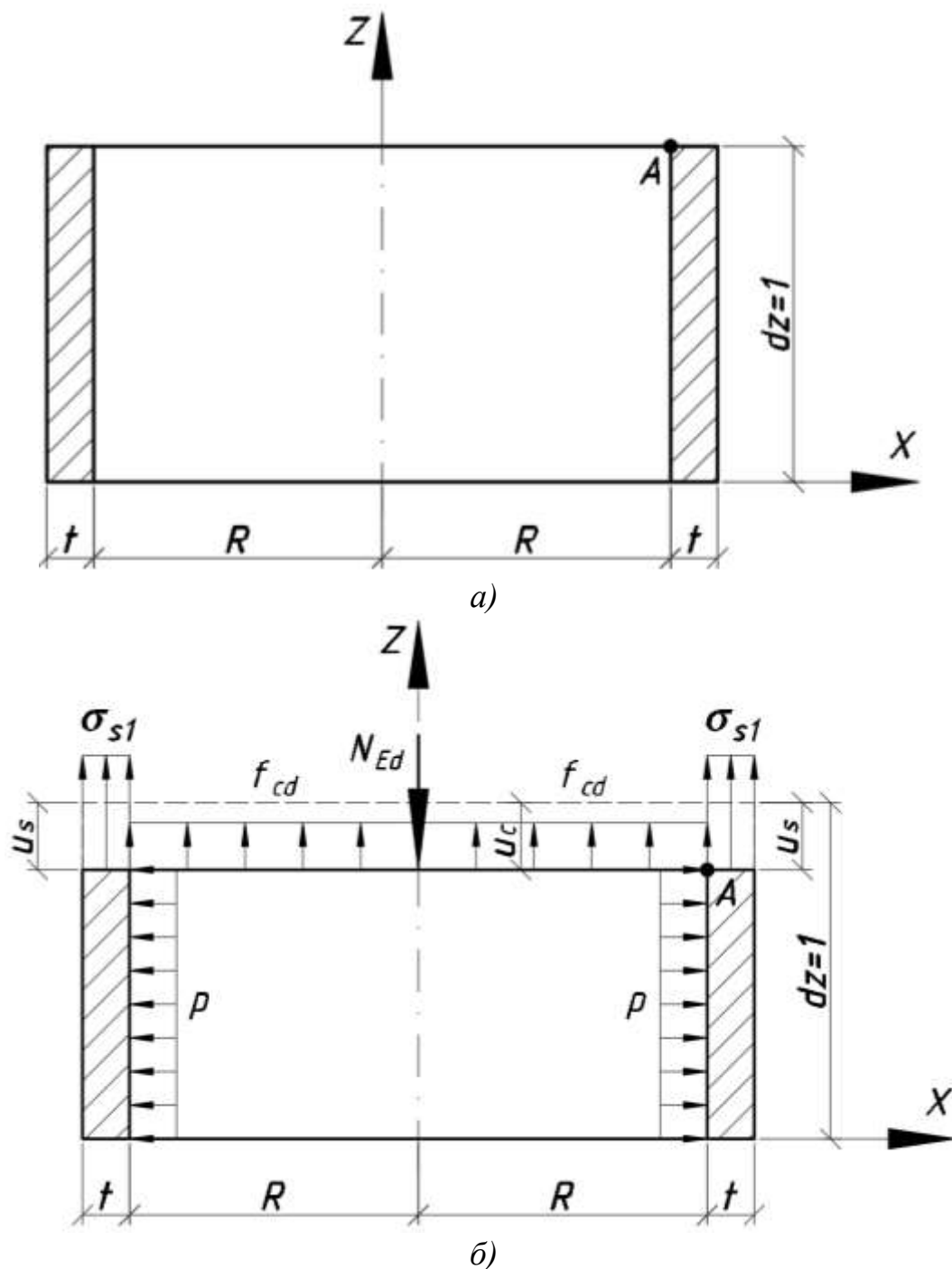


Рисунок 2.4 – Розрахункова схема перерізу частини трубобетонної колони товщиною $dz = 1$:

- а) вигляд перерізу до навантаження; б) деформація перерізу при стисканні;
 u_s – переміщення сталеві труби-оболонки; u_c – переміщення бетонного осердя трубобетонного елемента; N_{Ed} – розрахункове значення зовнішнього прикладеного навантаження; σ_{s1} – осьові напруження в стінках труби-оболонки; σ_{s2} – кільцеві напруження в стінках труби-оболонки; f_{cd} – граничне значення напружень в бетоні в момент його руйнування; p – меридіональний тиск бетону на трубу

Виразимо з рівняння (2.21) переміщення бетону u_c через такі характеристики, як відносне видовження бетонної частини розглядуваного перерізу ε_c та радіус осердя R , таким чином, аби наступним кроком розкрити значення відносного видовження ε_c шляхом представлення його як відношення меридіонального тиску бетону на трубу p до модуля деформацій бетону E_c та привести вираз до вигляду:

$$u_c = \varepsilon_c \cdot R = \left(\frac{p}{E_c} \right) R. \quad (2.22)$$

Якщо ж піти далі, то між розглянутим у виразі (2.22) переміщенням бетонної частини u_c та шуканою невідомою величиною кільцевих напружень σ_{s2} можливо встановити взаємозв'язок. Для цього у результуючій частині формули (2.22) меридіональний тиск бетону на трубу p замінимо правою частиною залежності (2.11) та отримаємо:

$$u_c = \left(\frac{\sigma_{s2}}{E_c} \cdot \frac{t}{R} \right) R, \quad (2.23)$$

де E_c – модуль деформацій бетону осердя; t – товщина сталеві труби-оболонки; R – радіус бетонної частини перерізу циліндричного трубобетонного елемента.

Після одержання фінальної формули (2.23) для знаходження переміщення бетонної частини u_c , розглянемо детальніше переміщення сталеві труби u_s з рівняння (2.21). Обрану характеристику було б доцільно виразити аналогічно із застосуванням невідомої величини кільцевих напружень σ_{s2} .

Раніше було визначено, що всі точки обраного перерізу (рис. 2.4, б) розгляданого елемента, які розташовані на межі «труба-бетон», в тому числі точка A , під дією прикладеного зовнішнього навантаження та наявності меридіонального тиску бетону на трубу p зміщуються в радіальному напрямку на величину, рівну

переміщенню сталевій оболонки u_s . Описане зміщення стає причиною збільшення загальної довжини внутрішньої сторони труби на значення видовження Δl_s :

$$\Delta l_s = l_s - l_s^0, \quad (2.24)$$

де l_s – кінцева довжина внутрішньої поверхні сталевій оболонки після видовження; l_s^0 – початкова довжина внутрішньої поверхні сталевій оболонки до видовження.

Застосуємо основну формулу розрахунку довжини кола для визначення початкової довжини внутрішньої поверхні сталевій труби l_s^0 :

$$l_s^0 = 2\pi \cdot R. \quad (2.25)$$

Звернемо увагу на той факт, що величина відносного значення переміщення сталевій труби u_s у радіальному напрямку так само, як і в кільцевому (меридіональному), дорівнюватиме u_s / R . Тобто відносні переміщення оболонки трубобетонного елемента в обох – кільцевому та радіальному – напрямках будуть рівними за значеннями.

Тобто після деформації довжина внутрішньої поверхні сталевій оболонки набуває значення, котре обчислюється за формулою:

$$l_s = 2\pi(R + u_s). \quad (2.26)$$

Таким чином вираз (2.24) для обчислення видовження труби-оболонки Δl_s після уточнення його складових за формулами (2.25) та (2.26) виглядатиме як залежність (2.27).

$$\Delta l_s = 2\pi(R + u_s) - 2\pi \cdot R. \quad (2.27)$$

Спростивши яку, запишемо остаточно:

$$\Delta l_s = 2\pi \cdot u_s. \quad (2.28)$$

В свою чергу, відносне значення такого видовження сталеві оболонки в кільцевому напрямку ε_s дорівнюватиме за загальною формулою:

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta l_s}{l_s^0}. \quad (2.29)$$

Адаптуємо загальну формулу (2.29) до конкретного випадку, котрий досліджується, за допомогою виразів (2.28) та (2.25):

$$\varepsilon_s = \frac{2\pi u_s}{2\pi R}. \quad (2.30)$$

Очевидно, що таке рівняння (2.30) потребує скорочення, після якого воно набуде вигляду:

$$\varepsilon_s = \frac{u_s}{R}. \quad (2.31)$$

Спираючись на приведені вище обґрунтування рівності відносних переміщень сталеві труби в обох розглянутих напрямках та вираз (2.31), відмітимо, що переміщення сталеві оболонки u_s може бути розраховано за формулою:

$$u_s = \varepsilon_s R. \quad (2.32)$$

Застосовану у наведеному вище виразі (2.32) величину відносної деформації сталеві оболонки в радіальному напрямку ε_s визначимо з використанням формул, в основу яких покладено закон Гука [35 – 38], адже розглядається випадок деформації

трубобетонного елемента, розрахунок якого базується на гіпотезі про рівність відносних переміщень сталеві труби в кільцевому та радіальному напрямках.

За формулою загального вигляду значення відносної деформації знаходять як:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu\sigma_y}{E} - \frac{\nu\sigma_z}{E}. \quad (2.33)$$

Зважаючи на таку формулу, представимо розрахунок величини відносної деформації сталеві оболонки в радіальному напрямку ε_s у вигляді рівняння (2.34), розміщеного нижче.

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_{s2} - \nu\sigma_{s1}}{E_s}, \quad (2.34)$$

де E_s – модуль деформацій сталеві труби-оболонки, а ν – коефіцієнт Пуассона.

Враховавши, що відносна деформація сталеві оболонки в радіальному напрямку ε_s у виразі (2.32) може бути обчислена за допомогою формули (2.34), переміщення сталеві труби u_s в радіальному напрямку розраховуються із застосуванням виразу:

$$u_s = \left(\frac{\sigma_{s2} - \nu\sigma_{s1}}{E_s} \right) R. \quad (2.35)$$

Фінальним етапом формування залежності для визначення шуканої величини кільцевих напружень σ_{s2} стане заміна у рівнянні (2.21) характеристики переміщення бетонної частини u_c на праву частину виразу (2.23) та аналогічне розкриття сутності переміщення сталеві труби u_s з отриманої вище формули (2.35). Описані зміни приведуть до залежності:

$$\left(\frac{\sigma_{s2}}{E_c} \cdot \frac{t}{R} \right) R = \left(\frac{\sigma_{s2} - \nu \sigma_{s1}}{E_s} \right) R. \quad (2.36)$$

Цілком зрозуміло, що подана форма залежності (2.36) потребує вдосконалення. Тож, після виконання необхідних математичних перетворень для знаходження з неї кільцевих напружень σ_{s2} розглядувана залежність набуде наступного вигляду:

$$\sigma_{s2} = \frac{\nu}{1 - \frac{E_s}{E_c} \frac{t}{R}} \sigma_{s1}, \quad (2.37)$$

де $D = 2R$ – внутрішній діаметр сталеві труби-оболонки.

З метою спрощення форми, у якій подано вираз (2.37), уведемо коефіцієнт співвідношення модулів деформацій сталі та бетону α_s , значення якого розраховується з наступної формули:

$$\alpha_s = \frac{E_s}{E_c}. \quad (2.38)$$

Після застосування такого спрощення до виразу (2.37) отримуємо таку залежність:

$$\sigma_{s2} = \frac{\nu}{1 - 2\alpha_s \frac{t}{D}} \sigma_{s1}. \quad (2.39)$$

Повернемося до виразу (2.19) та порівняємо його із отриманою залежністю (2.39). Результатом такого порівняння стане логічний висновок щодо уведеного коефіцієнта k , котрий характеризує співвідношення меридіональних напружень σ_{s2}

та осьових напружень σ_{s1} та, зважаючи на залежність (2.39), може обраховуватися за формулою:

$$k = \frac{\nu}{1 - 2\alpha_s \frac{t}{D}}. \quad (2.40)$$

Спираючись на одержану формулу (2.40) для обчислення коефіцієнта k , наведений раніше вираз (2.20), котрий дозволяє визначити міцність нормального перерізу розглядуваного в даному дослідженні циліндричного трубобетонного елемента, може бути перетворено на рівняння наступного вигляду:

$$N_{Rd} = A_c f_{cd} + \left(\frac{2\nu}{1 - 2\alpha_s \frac{t}{D}} + 1 \right) A_s \sigma_{s1}. \quad (2.41)$$

На даному етапі виведення розрахункових формул очевидно, що формулою для перевірки міцності нормального перерізу центрально стиснутого циліндричного трубобетонного елемента може слугувати вираз (2.20) чи (2.41), але водночас з'являється необхідність у додатковому рівнянні, яке, в свою чергу, дозволило б обчислити значення осьових напружень σ_{s1} .

В рамках проведення цього дослідження для написання дипломної магістерської роботи на роль такого додаткового рівняння було розглянуто умови двох теорій пластичності, перша з яких є теорією пластичності Сен-Венана, а в якості другої було обрано теорію пластичності Губера-Мізеса-Генки [4 – 7, 8]. Тож, нижче наводяться умови цих теорій пластичності в тому вигляді, в якому стало б можливим їх використання як додаткових рівнянь. Формулу, засновану на умові теорії пластичності Сен-Венана, розміщуємо під номером (2.42) тоді, як вираз за теорією пластичності Губера-Мізеса-Генки наводиться із номером (2.43).

$$\sigma_{s1} + \sigma_{s2} = f_{yd}, \quad (2.42)$$

$$\sigma_{s1}^2 - \sigma_{s1}\sigma_{s2} + \sigma_{s2}^2 = f_{yd}^2. \quad (2.43)$$

Шляхом застосування обраних додаткових рівнянь (2.42) і (2.43) спільно з основними залежностями (2.17) – (2.20) після проведення ряду математичних перетворень та введення коефіцієнта «зміцнення» бетону осердя трубобетонного елемента k_{cs} отримаємо результуючу формулу розрахунку несучої здатності трубобетонного елемента при центральному стисненні у вигляді:

$$N_{Rd} = k_{cs}A_c f_{cd} + A_s f_{yd}. \quad (2.44)$$

У тому випадку, коли результуюча формула несучої здатності (2.44) застосовуватиметься згідно зі згаданою вище умовою теорії пластичності Сен-Венана, коефіцієнт «зміцнення» бетону осердя трубобетонного елемента k_{cs} у даній формулі набуватиме значення, котре може бути розраховане з представленого далі рівняння:

$$k_{cs} = 1 + \frac{4k}{k+1} \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \frac{t}{D}, \quad (2.45)$$

яке містить у собі уведений раніше коефіцієнт k , що характеризує співвідношення меридіональних напружень σ_{s2} та осьових напружень σ_{s1} і знаходиться за формулою (2.40).

В іншому ж випадку, при застосуванні умови теорії пластичності Губера-Мізеса-Генки, на відміну від першого, величина коефіцієнта «зміцнення» бетону осердя трубобетонного елемента k_{cs} обчислюватиметься за наступним виразом:

$$k_{cs} = 1 + 4 \left(\frac{2k + 1}{\sqrt{k^2 + k + 1}} - 1 \right) \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \frac{t}{D}. \quad (2.46)$$

Таким чином, маючи основний вираз для визначення міцності нормального перерізу досліджуваного циліндричного трубобетонного елемента (2.44) у формі, котра адаптована для застосування разом із обраними умовами теорій пластичності, та формули розрахунку значення коефіцієнта «зміцнення» бетону осердя трубобетонного елемента k_{cs} за обома теоріями пластичності (2.45, 2.46), остаточно сформуємо два рівняння для визначення несучої здатності нормального перерізу трубобетонного елемента за різними теоріями.

Теорія пластичності Сен-Венана дозволяє проводити необхідний розрахунок міцності за рівнянням:

$$N_{Rd} = \left(1 + \frac{4k}{k + 1} \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \frac{t}{D} \right) A_c f_{cd} + A_s f_{yd}. \quad (2.47)$$

Якщо ж аналогічним чином звернутися до умови теорії пластичності Губера-Мізеса-Генки, то фінальна формула, цілком логічно, набуде дещо іншого вигляду:

$$N_{Rd} = \left(1 + 4 \left(\frac{2k + 1}{\sqrt{k^2 + k + 1}} - 1 \right) \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \frac{t}{D} \right) A_c f_{cd} + A_s f_{yd}. \quad (2.48)$$

Обидва наведені вирази – (2.47) та (2.48) – можуть бути обґрунтовано застосовані при проведенні розрахунку значень міцності нормального перерізу циліндричного трубобетонного елемента при осьовому стисненні.

2.3. Методика проведення розрахунку за виведеними формулами

На основі формул, виведених у пункті 2.2 цієї дослідницької роботи, було сформовано методику проведення розрахунку значень міцності нормального перерізу циліндричного трубобетонного елемента при осьовому стисканні [8].

Для чіткішого розуміння представляємо цю методику на рисунку 2.5 у вигляді блок-схеми.

Таким чином блок-схема (рис. 2.5) використання складеного алгоритму розрахунку міцності демонструє, що для початку розрахунку міцності за розробленою методикою необхідно задати вихідні значення таких величин, як:

- D – внутрішній діаметр труби-оболонки;
- t – товщина стінки труби;
- f_{yd} – розрахункове граничне значення напружень сталі при руйнуванні;
- E_s – модуль деформацій сталі;
- ν – коефіцієнт Пуассона;
- f_{cd} – розрахункове граничне значення напружень бетону при руйнуванні;
- E_c – модуль деформацій бетону.

За наявності таких даних стає можливою реалізація послідовного розрахунку за представленими вище формулами з метою одержання наприкінці значення міцності нормального перерізу циліндричного трубобетонного елемента в якості результату.

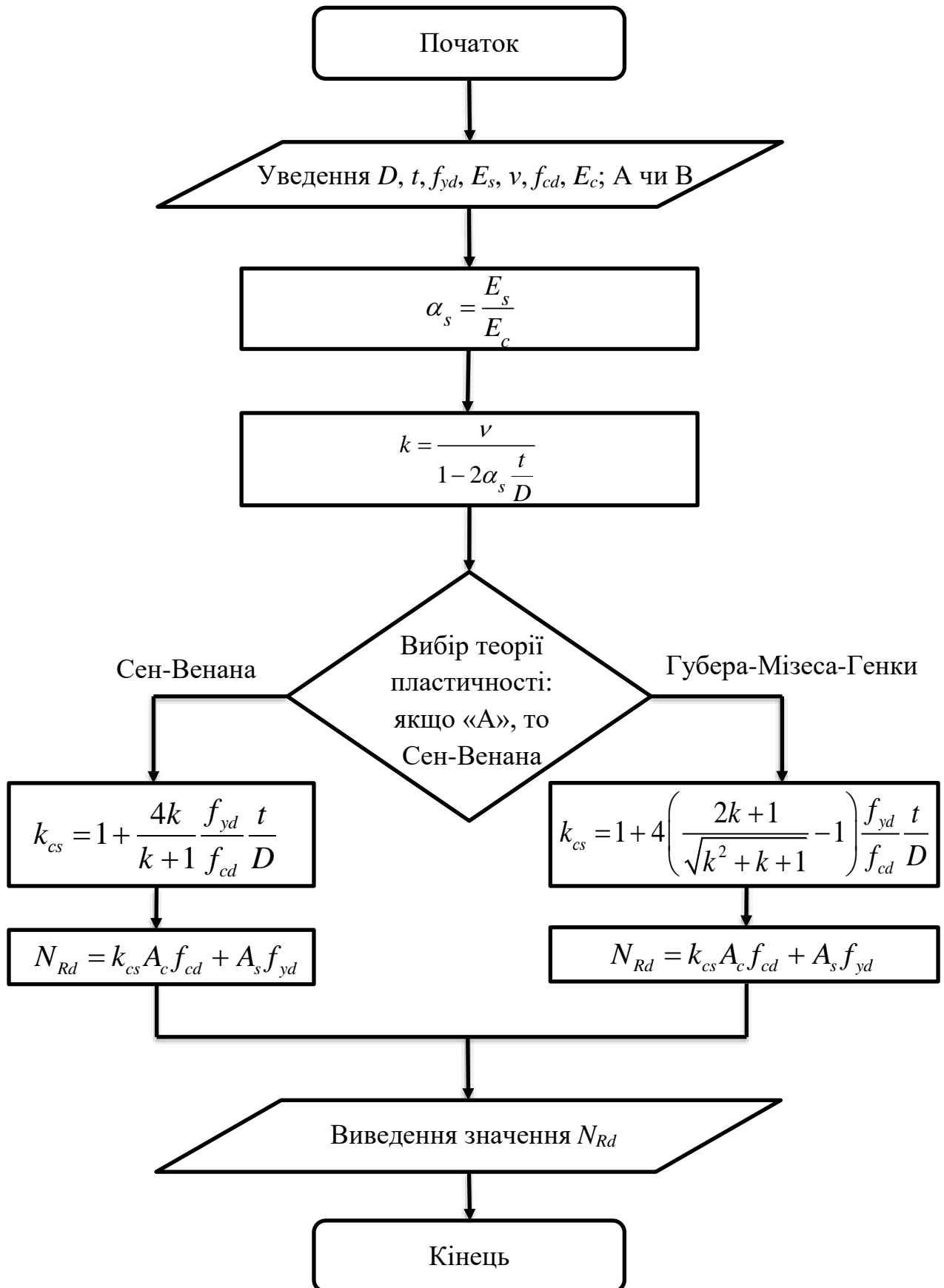


Рисунок 2.5 – Блок-схема розробленої методики розрахунку міцності нормального перерізу циліндричного трубобетонного елемента при стисканні

2.4. Приклад розрахунку міцності за розробленою методикою

Аби довести можливість застосування описаної методики для обчислення міцності нормального перерізу, сформуємо приклад такого розрахунку для конкретного випадку трубобетонної колони із наступними заданими параметрами:

- внутрішній діаметр сталеві труби $D = 102$ мм;
- товщина стінки сталеві труби $t = 3$ мм;
- розрахункове значення напружень межі текучості сталі $f_{yd} = 287$ МПа;
- модуль деформації сталі $E_s = 210000$ МПа;
- коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$;
- розрахункове значення напружень бетону при руйнуванні $f_{cd} = 13,5$ МПа;
- модуль деформації бетону $E_c = 25600$ МПа.

Записавши вихідні дані, переходимо до першого кроку розрахунку за розробленою методикою (рис. 2.5) – знаходимо значення коефіцієнта α_s , котрий характеризує співвідношення модулів деформацій сталі та бетону, із виразу (2.38):

$$\alpha_s = \frac{E_s}{E_c} = \frac{210000}{25600} = 8,203.$$

Наступним кроком обчислюємо значення параметра k за формулою (2.40):

$$k = \frac{\nu}{1 - 2\alpha_s \frac{t}{D}} = \frac{0,3}{1 - 2 \cdot 8,203 \cdot \frac{3}{102}} = 0,580.$$

Далі шлях розрахунку за методикою розгалужується через вибір теорії пластичності, котру бажано було б застосувати. З метою повної демонстрації розрахуємо необхідні значення за обома теоріями. Тож, значення коефіцієнта «зміцнення» бетону осердя трубобетонного елемента k_{cs} може бути знайденим наступним чином:

- за теорією Сен-Венана із виразу (2.45):

$$k_{cs} = 1 + \frac{4 \cdot 0,580}{0,580 + 1} \cdot \frac{287}{13,5} \cdot \frac{3}{102} = 1,918;$$

- за теорією Губера-Мізеса-Генки із виразу (2.46):

$$k_{cs} = 1 + 4 \left(\frac{2 \cdot 0,580 + 1}{\sqrt{0,580^2 + 0,580 + 1}} - 1 \right) \frac{287}{13,5} \cdot \frac{3}{102} = 2,231.$$

Останнім кроком цього розрахунку є обчислення значення міцності нормального перерізу трубобетонної колони, котре здійснюємо за формулою загального вигляду (2.44) або окремо для кожної з теорій пластичності за виразами (2.47) та (2.48).

Таким чином значення міцності складає:

- за теорією Сен-Венана:

$$N_{Rd} = (1,918 \cdot 7238,2 \cdot 13,5 + 933,1 \cdot 287) \cdot 10^{-3} = 455,2 \text{ кН};$$

- за теорією Губера-Мізеса-Генки:

$$N_{Rd} = (2,231 \cdot 7238,2 \cdot 13,5 + 933,1 \cdot 287) \cdot 10^{-3} = 485,8 \text{ кН}.$$

Отримавши значення міцності за обома розглянутими теоріями пластичності, співставлено одержані результати шляхом їх порівняння із застосуванням формули для обчислення відносної похибки:

$$\Delta = \frac{N_{Rd}^{ГМГ} - N_{Rd}^{СВ}}{N_{Rd}^{ГМГ}}, \quad (2.49)$$

де N_{Rd}^{GM} – значення міцності нормального перерізу трубобетонної колони, розраховане на основі теорії пластичності Губера-Мізеса-Генки, N_{Rd}^{CB} – значення міцності нормального перерізу трубобетонної колони, розраховане на основі теорії пластичності Сен-Венана.

Після застосування формули (2.49) отримано значення відносної похибки:

$$\Delta = \frac{485,8 - 455,2}{485,8} \cdot 100\% = 6,3\%.$$

Така похибка свідчить про невелику розбіжність при розрахунку за різними теоріями пластичності.

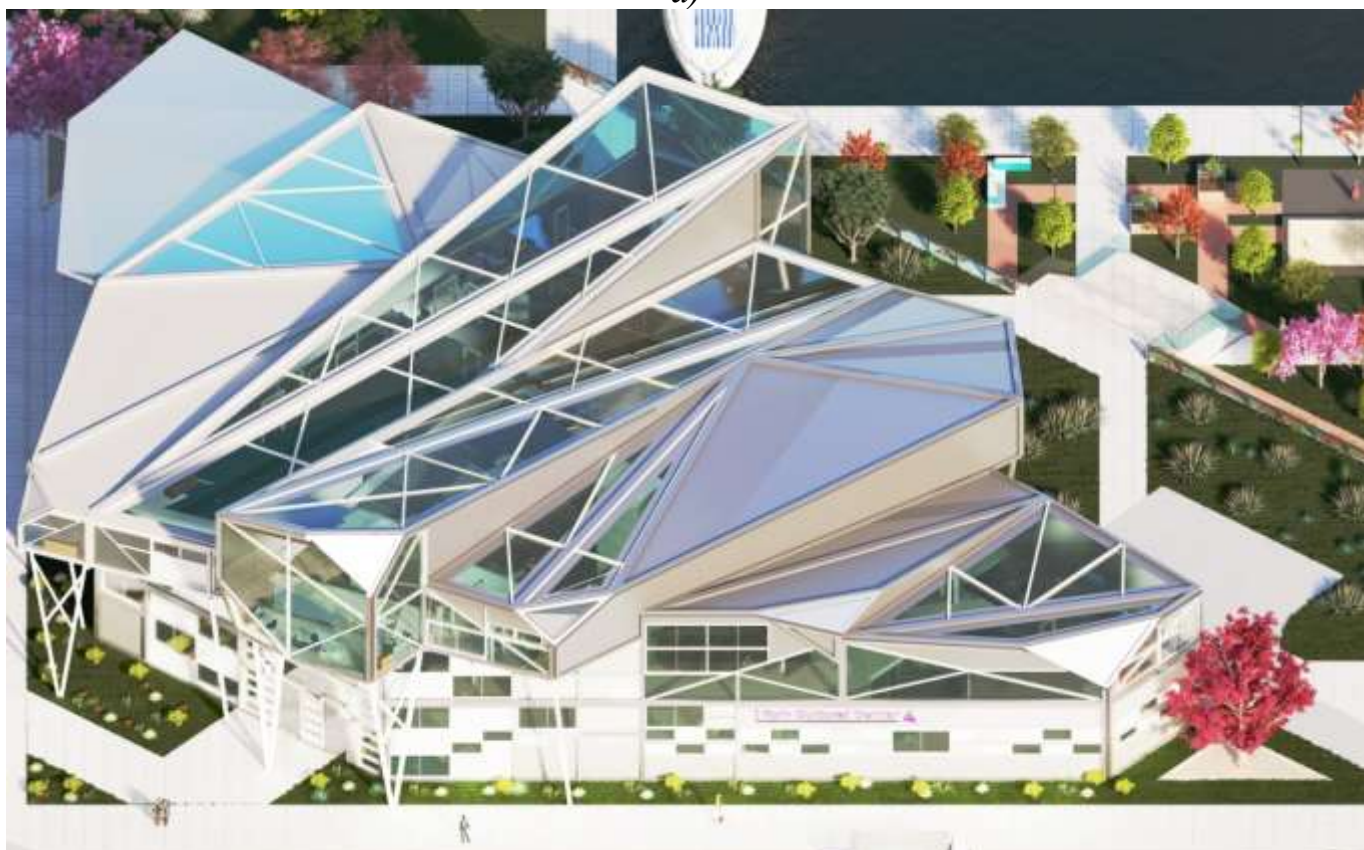
Наведений приклад розрахунку міцності трубобетонних конструкцій за розробленою методикою доводить можливість її застосування на практиці. Тому саме за цією методикою (рис. 2.5) було проведено аналогічні обчислення міцності трубобетонних колон при розробленні проекту С-955 культурного центру у м. Київ [9] для участі у конкурсі STEEL FREEDOM 2021.

На головному фасаді запроектованого культурного центру (рис. 2.6, а) добре видно зовнішні трубобетонні колони, котрі попарно складають V-подібні опорні конструкції, на які спирається третій поверх будівлі.

Архітектурна концепція проекту передбачала таку конфігурацію верхнього поверху, що його приміщення виходили за межі перших двох поверхів. Це, в свою чергу, давало можливість створити складне покриття (рис. 2.6, б), котре стало «родзинкою» будівлі. Для втілення цієї ідеї було необхідно запроектувати зовнішні колони, котрі б стали несучими для конструкцій третього поверху. Саме таку роль взяли на себе трубобетонні колони, розраховані за розробленою методикою, адже вони мали невеликі габарити та гарну архітектурну виразність.



а)



б)

Рисунок 2.6 – Проект культурного центру у м. Київ [9]:
а) головний фасад; б) вигляд згори

Кожна V-подібна опорна конструкція (рис. 2.7) безпосередньо складалася з двох нахилених трубобетонних колон, котрі було закріплено між собою за допомогою сталевих в'язей.

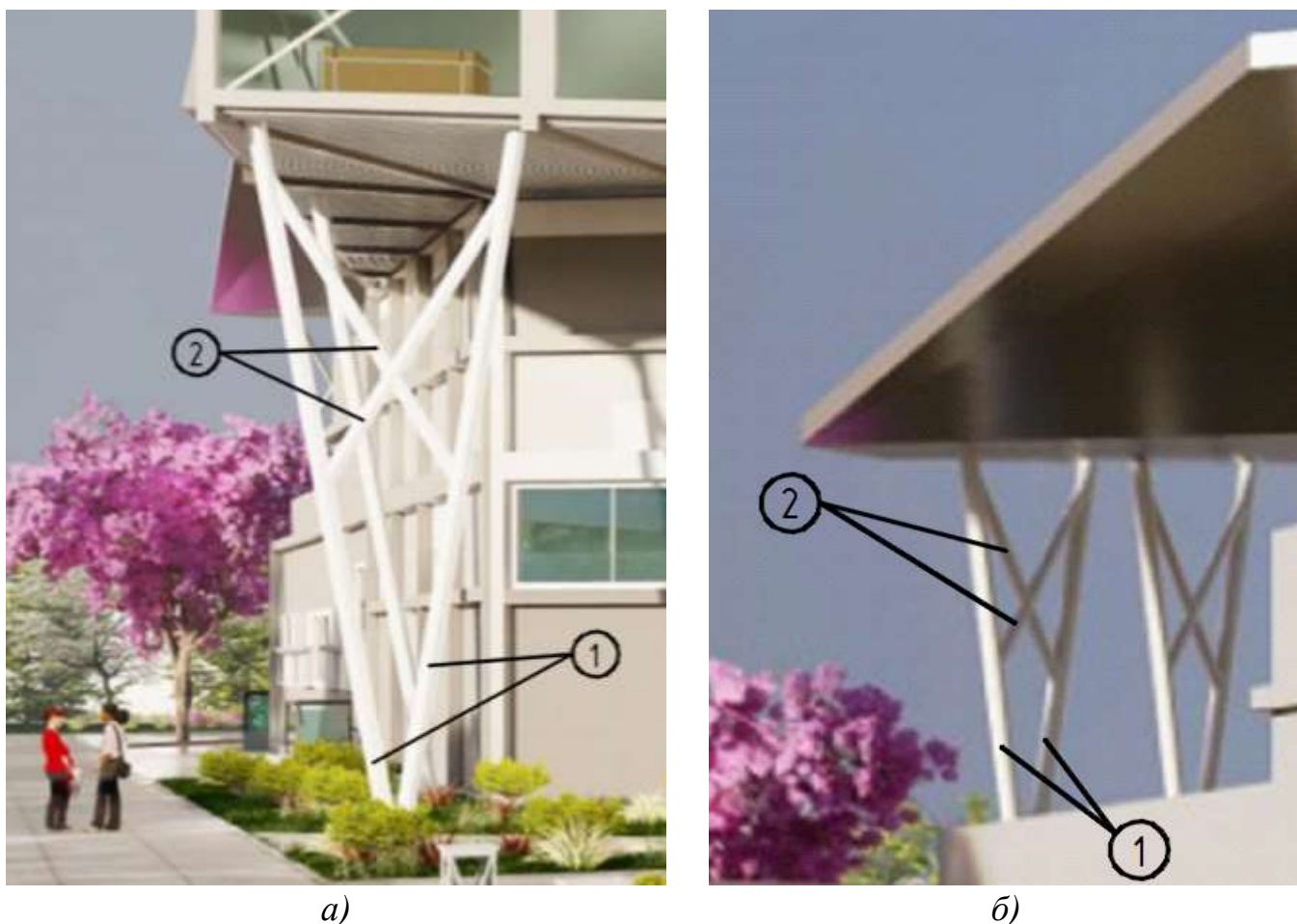


Рисунок 2.7 – V-подібні опорні конструкції з трубобетону [9]:

а) опори третього поверху; б) опори навісу;

1 – трубобетонні колони; 2 – сталеві в'язі

Запроектовані для культурного центру С-955 [9] несучі трубобетонні колони ще раз доводять можливість застосування розробленої методики розрахунку міцності трубобетонних елементів на практиці.

2.5. Висновки за розділом 2

За інформацією, викладеною у розділі 2 цієї дослідницької роботи, було сформульовано наступні висновки:

1. Обрані для розрахунку постулати та розроблена за ними розрахункова схема нормального перерізу трубобетонної колони представляють собою надійну основу для проведення необхідного розрахунку міцності.
2. Виведені розрахункові формули для обчислення значень міцності є логічними, обґрунтованими і можуть застосовуватися у подальшому для аналогічних розрахунків.
3. Розроблена за виведеними формулами методика проведення розрахунку є простою для застосування, про що свідчить наведений приклад, тож може бути поширеною для широкого використання.
4. Значення міцності, отримані із застосуванням різних теорій пластичності, мають певну відмінність, але похибка за своєю величиною не має суттєвого впливу на результат розрахунку.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ НОРМАЛЬНОГО ПЕРЕРІЗУ ТРУБОБЕТОННОГО ЕЛЕМЕНТА

Цілком зрозуміло, що будь-які теоретичні дослідження не можуть вважатися повноцінними без зв'язку їхніх результатів із аналогічними результатами, отриманими експериментальним шляхом. Тому багатьма науковцями були реалізовані експериментальними дослідженнями міцності трубобетонних елементів.

Наприклад, Єрмоленко Дмитро Адольфович у своїй дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук та монографії на тему «Об'ємний напружено-деформований стан трубобетонних елементів» описав проведені експерименти та їхні результати [39 – 40]. Також і у монографії Воскобійник Олени Павлівни «Сталезалізобетон: надійність, технічні стани, ризики» [41] можна знайти матеріали натурних випробувань різноманітних зразків сталезалізобетонних елементів, зокрема і трубобетонних колон. Велика кількість інших талановитих авторів так само внесли до своєї робіт відомості щодо проведених з метою дослідження міцності експериментів [42 – 43].

Зважаючи на важливість порівняння значень, отриманих аналітично, із експериментальними даними, нижче наведемо структурну схему, технологію виготовлення зразків та методику для проведення натурних випробувань, опишемо результати, які було отримано в ході цього експерименту, та зробимо висновки стосовно розглянутих результатів.

3.1. Структурна схема та технологія виготовлення зразків

З метою проведення лабораторних випробувань та отримання їхніх результатів для дослідження міцності трубобетонних колон при дії короткочасного навантаження було обрано 19 серій зразків, кожна з яких включала в себе 3 зразки однакової структури [43].

В якості оболонок для виготовлених трубобетонних зразків використовувалися сталеві безшовні гарячедеформовані труби загального призначення [44] із розмірами (рис. 3.1):

- зовнішній діаметр труб $d_{зовн}$: 113 та 133 мм;
- товщина стінки труб t : 1, 2, 3 та 4 мм;
- висота труби h : 400 мм для всіх серій, окрім ТБ-II-9, труби якої були заввишки 2100 мм.

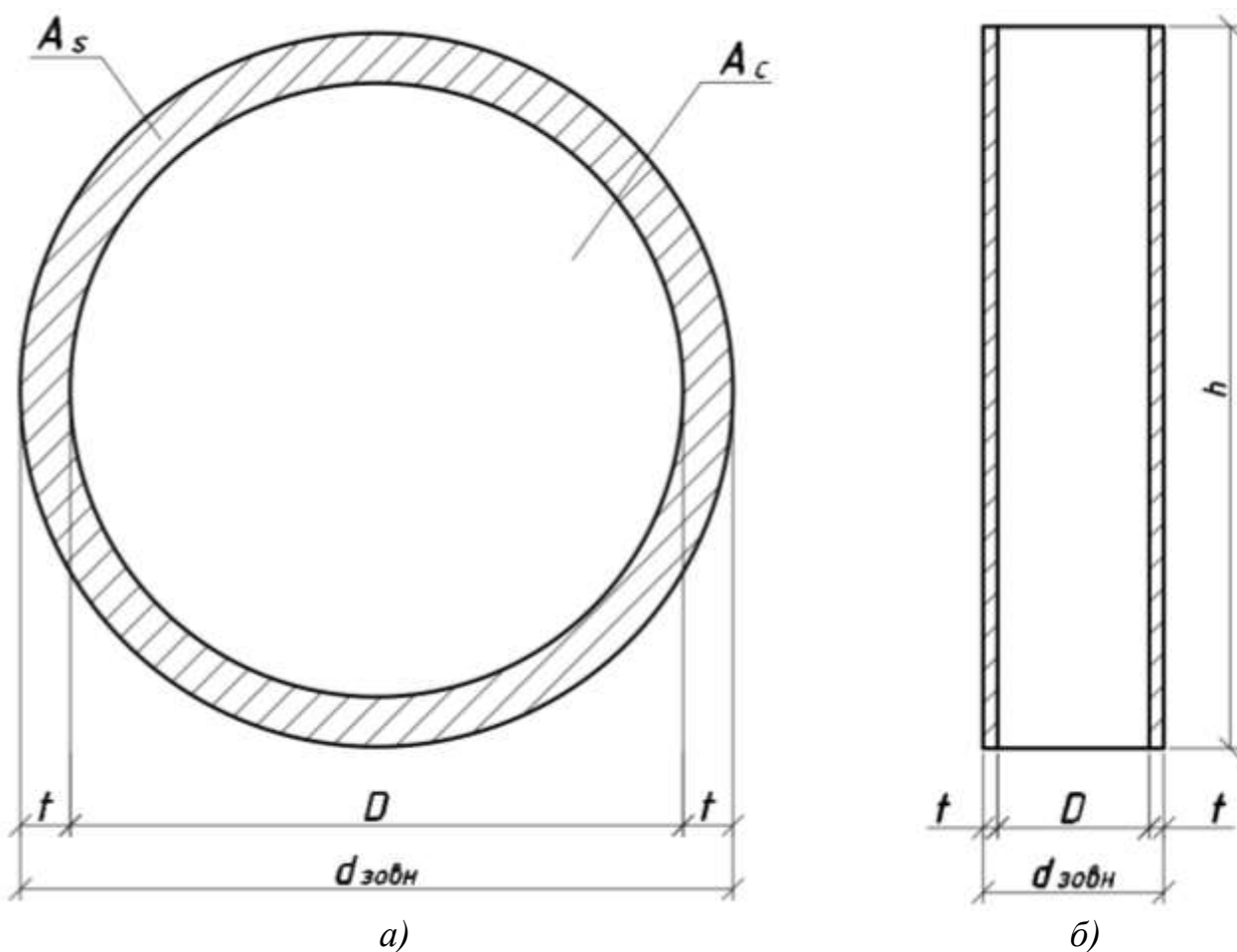


Рисунок 3.1 – Структурна схема дослідних трубобетонних зразків із їхніми геометричними характеристиками:

а) поперечний переріз зразка; б) поздовжній переріз зразка

Труби-оболонки було обрано таким чином, що значення їхніх механічних характеристик відрізнялися одне від одного не більше, ніж на 3%. При розрізанні труб особливо уважно слідкували за якістю обробки торців, аби їхня площа була

перпендикулярна поздовжній осі симетрії зразка. Необхідна товщина стінок труб була отримана шляхом їхнього обточування на токарному верстаті.

Для частини зразків (зразки серій з індексом «і» в позначенні) перед бетонуванням було створено ізоляційний шар на внутрішній поверхні сталеві труби. Таким чином виникла можливість випробувати зразки, котрі не мали зчеплення між бетонним осердям та сталеві оболонкою.

Після підбору труб для оболонок майбутніх зразків було проведено заміри геометричних характеристик кожної з них, обчислене середнє значення величин для кожної серії та занесено ці дані до таблиці (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Геометричні характеристики дослідних зразків трубобетонних колон ([43], стор. 99)

№	Серія	Розміри, мм		Площа поперечного перерізу, см ²	
		<i>D</i>	<i>t</i>	<i>A_c</i>	<i>A_s</i>
1	ТБ-I-1	124,9	1,18	122,6	4,77
2	ТБ-I-2	130,0	2,13	122,6	8,58
3	ТБ-I-3	125,0	3,89	122,6	15,81
4	ТБ-II-1	125,1	1,37	122,9	5,47
5	ТБ-II-2	125,7	1,76	122,8	7,06
6	ТБ-II-3	125,0	3,80	122,7	15,4
7	ТБі-II-4	124,7	3,85	122,6	15,65
8	БВТ-II-7	124,9	3,97	122,5	16,17
9	БВТі-II-8	125,2	3,87	123,0	15,75
10	ТБ-II-9	124,9	3,91	122,5	16,02
11	ТБ-III-1	124,9	0,79	122,7	3,29
12	ТБ-III-2	125,1	1,88	122,8	6,86
13	ТБ-III-3	125,2	3,85	123,0	15,66
14	ТБ-IV-1	107,0	2,03	89,87	7,02
15	ТБ-V-2	105,0	2,83	86,55	9,65
16	ТБ-V-3	113,7	3,67	88,75	12,73
17	БВТ-IV-1	111,1	2,03	89,87	6,95
18	БВТ-V-2	111,3	3,13	86,55	10,69
19	БВТ-V-3	114,3	3,67	89,87	12,69

Усі зразки було забетоновано з одного замісу бетонної суміші промислового виготовлення на цементному в'язучому марки 500.

З метою випробування зразків із різною міцністю бетонного осердя експерименти проводилися для такого часу тверднення бетону:

- 7 днів – для зразків серії I;
- 28 днів – для зразків серії II;
- 60 днів – для зразків серії III.

Додаткові серії IV та V було виготовлено з бетонним осердям низької міцності.

До початку проведення натурних випробувань виготовлених зразків після замірів геометричних розмірів було визначено механічні характеристики обраних матеріалів, а саме випробувано сталеві труби на стиск, стандартні смуги із них – на розтяг та бетонних кубиків, призм і циліндрів – на стиск. Результати цих випробувань занесено до таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Механічні характеристики матеріалів зразків ([43], стор. 100)

Бетон				
Серія	Міцність, МПа			Модуль пружності $E_c \cdot 10^{-4}$, МПа
	кубикова	призмова	циліндрична	
I	13,8	11,5	10,2	2,30
II	23,6	16,7	14,0	2,85
III	28,5	18,7	16,2	3,05
IV	4,5	3,8	3,2	2,15
V	12,6	6,3	5,3	3,85
Сталь				
Границя текучості $f_y = 305$ МПа			Модуль пружності $E_s = 2,08 \cdot 10^5$ МПа	

3.2. Методика проведення натурних випробувань для виготовлених зразків

Виготовлені зразки випробувалися гідравлічними пресами ПММ-100 та ПММ-250. Прикладання навантаження відбувалося ступенями приблизно по 10% від очікуваного значення руйнівного навантаження. В ході експерименту проводилися заміри поздовжніх і поперечних деформацій зразків. База вимірювання

поздовжніх деформацій становила 200 мм, а поперечних – 20 мм по периметру зразка. Деформації було виміряно за допомогою тензорезисторів та звичайних індикаторів годинникового типу.

Підчас проведення експериментів зі зразками серій БВТ додатково було зроблено заміри деформації бетонного осердя між опорними плитами на базі 400 мм із використанням індикаторів годинникового типу, котрі було прикріплено до закладених у бетонну частину металевих стрижнів, що проходили крізь ізольовані отвори в стінках сталеві оболонки.

Для забезпечення максимального можливого наближення до паралельного положення плит преса, тобто для прикладання центрального вертикального навантаження, кожен зразок перед випробуванням було прикріплено торцями до металевих прокладок за допомогою розчину, котрий після тужавіння з'єднує ці деталі для їхньої сумісної роботи. Також розчин може передавати навантаження на бетонне осердя, якщо його поверхня у зразку знаходиться глибше площини торця труби, наприклад. Тож з'єднання розчином забезпечує рівномірну передачу навантаження від преса через металеві прокладки на всю поверхню зразка

Як демонструють результати теоретичних досліджень [43], основною характеристикою трубобетонних елементів, котра визначає граничний стан при осьовому стиску, є їхня гранична деформація тоді, як несуча здатність може бути підібрана на основі цієї деформації. Ось чому в описаному дослідженні граничне навантаження на зразок визначалося в момент досягнення поздовжніми деформаціями їхнього граничного допустимого значення, котре було прийнято на рівні відносної поздовжньої деформації $\varepsilon_i = 220 \cdot 10^{-5}$, адже саме таке значення відповідає початку текучості сталі оболонки та прискореному тріщиноутворенню у бетоні осердя.

Отже, представимо методику проведення натурних випробувань для виготовлених зразків у вигляді схеми (рис. 3.2), котра описує всі стадії реалізації експерименту.

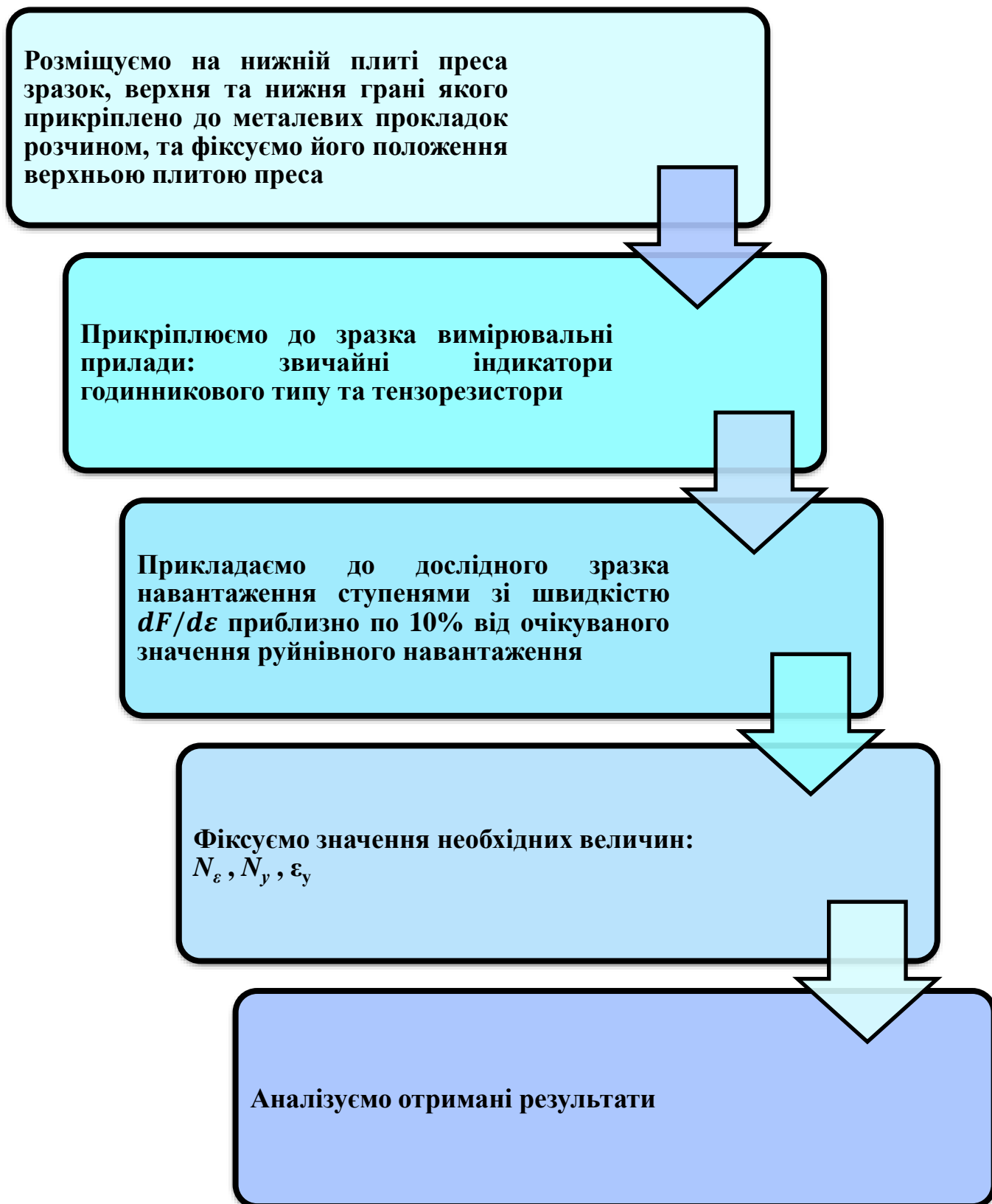


Рисунок 3.2 – Методика проведення натурних випробувань для зразків, що виготовлені з трубобетону

3.3. Результати проведених випробувань

Основними результатами проведених експериментів стали значення навантажень, які характеризували три стадії випробування зразка:

- навантаження N_ϵ при досягненні відносними поздовжніми деформаціями зразка обраного граничного значення $\epsilon_i = 220 \cdot 10^{-5}$;
- навантаження N_y , яке характеризує початок швидкого зростання деформацій, тобто момент переходу металом межі текучості.

Також було зафіксовано значення деформацій зразків граничного стану при навантаженні N_y та обчислено значення відносних деформацій ϵ_y .

Всі результати проведених випробувань представляємо нижче в табличній формі (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Експериментальні навантаження і деформації трубобетонних зразків ([43], стор. 102)

№	Серія	Навантаження, кН		Деформація $\epsilon_y \cdot 10^5$ при N_y
		N_ϵ	N_y	
1	ТБ-I-1	386,7	390,7	256
2	ТБ-I-2	535,0	576,3	300
3	ТБ-I-3	840,0	908,3	268
4	ТБ-II-1	488,0	491,7	230
5	ТБ-II-2	547,6	566,7	233
6	ТБ-II-3	905,0	960,0	260
7	ТБi-II-4	872,7	950,0	275
8	БВТ-II-7	883,0	893,3	230
9	БВТi-II-8	830,0	860,0	280
10	ТБ-II-9	837,5	843,3	290
11	ТБ-III-1	457,3	533,3	340
12	ТБ-III-2	590,3	620,0	270
13	ТБ-III-3	960,0	980,0	245
14	ТБ-IV-1	315,0	320,3	232
15	ТБ-V-2	437,3	412,5	218
16	ТБ-V-3	565,0	569,4	246
17	БВТ-IV-1	380,0	395,1	250
18	БВТ-V-2	438,3	441,3	245
19	БВТ-V-3	505,0	522,2	230

3.4. Висновки за розділом 3

Після аналізу проведених експериментальних досліджень міцності елементів з трубобетону можна зробити такі висновки:

1. Структурна схема, технологія виготовлення зразків та методика проведення натурних випробувань цілком відповідають меті експерименту та оптимізують процес його проведення.
2. Результати проведених випробувань показали, що зі збільшенням товщини стінки сталеві труби-оболонки деформативність досліджуваних елементів зменшується, а несуча здатність при рівних значеннях деформацій збільшується в усіх випадках.
3. Потовщення стінки сталеві труби не підвищує ефективність трубобетону, адже для зразків серії ТБ-II-3 площу поперечного перерізу труби було збільшено у 2,8 рази (табл. 3.1), але несуча здатність N_e зросла лише у 1,8 рази, а N_y – у 1,9 рази, тобто ефективність таких зразків знизилась у 1,5 рази.
4. При збільшенні міцності бетону осердя характер деформування зразків трубобетонних елементів не змінюється, а зменшення деформативності та підвищення несучої здатності є незначними (табл. 3.3).
5. Довжина трубобетонних елементів не впливає на їхню деформативність, про що свідчить співставлення результатів випробування зразків різної довжини: 400 мм та 2100 мм.
6. Несуча здатність та деформативність трубобетонних елементів не залежить від наявності або відсутності зчеплення між бетоном осердя та сталлю труби-оболонки.

4. ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕОРЕТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ З ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ ДАНИМИ

За описаною у розділі 2 цієї роботи методикою розрахунку міцності нормального перерізу труобетонного елемента було проведено відповідні обчислення для дослідних зразків, розглянутих у розділі 3. У згаданій методиці пропонується обрати для розрахунку одну з умов пластичності: Сен-Венана чи Губера-Мізеса-Генки. Тож, аби визначити котра з них дозволяє отримати більш точний результат, необхідно провести спочатку порівняння значень коефіцієнта «зміцнення» бетону, розрахованих за різними теоріями пластичності, потім співставити значення міцності за кожною з теорій із відповідними експериментальними значеннями та, як підсумок, порівняти точність отриманих розрахункових значень за двома розглянутими теоріями пластичності. Аналіз цих порівнянь дасть змогу зробити висновок щодо того, в якій з теорій значення міцності, розраховані на її основі, є ближчими до реалій.

4.1. Порівняння значень коефіцієнта «зміцнення» бетону, розрахованих за різними теоріями пластичності

З метою проведення порівняльного аналізу значень коефіцієнта «зміцнення» бетону осердя труобетонного елемента, було проведено необхідні розрахунки для кожної серії дослідних зразків за теоріями пластичності Сен-Венана та Губера-Мізеса-Генки.

Значення за теорією Сен-Венана було отримано з рівняння (2.45) тоді, як аналогічний результат за теорією Губера-Мізеса-Генки було отримано після застосування виразу (2.46).

Безпосередньо порівняти отримані дані дозволили значення відносної похибки, котрі було обчислено для кожної серії зразків окремо за формулою:

$$\Delta_k = \frac{k_{cs}^{ГМГ} - k_{cs}^{СВ}}{k_{cs}^{ГМГ}} \cdot 100\%, \quad (4.1)$$

де Δ_k – відносна похибка значень коефіцієнта «зміцнення» бетону, обрахованих за різними теоріями пластичності, $k_{cs}^{ГМГ}$ – значення коефіцієнта «зміцнення» бетону за теорією пластичності Губера-Мізеса-Генки, k_{cs}^{CB} – значення коефіцієнта «зміцнення» бетону за теорією пластичності Сен-Венана.

Результати проведених розрахунків представлено нижче у табличній формі (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Значення коефіцієнта «зміцнення» бетону, отримані на основі теорій пластичності Сен-Венана та Губера-Мізеса-Генки

№	Серія	k_{cs}^{CB}	$k_{cs}^{ГМГ}$	$\Delta_k, \%$
1	ТБ-I-1	1,266	1,412	10,34
2	ТБ-I-2	1,52	1,801	15,60
3	ТБ-I-3	2,344	3,032	22,69
4	ТБ-II-1	1,211	1,325	8,60
5	ТБ-II-2	1,28	1,433	10,68
6	ТБ-II-3	1,778	2,191	18,85
7	ТБi-II-4	1,797	2,219	19,02
8	БВТ-II-7	1,833	2,274	19,39
9	БВТi-II-8	1,798	2,221	19,05
10	ТБ-II-9	1,814	2,245	19,20
11	ТБ-III-1	1,102	1,158	4,84
12	ТБ-III-2	1,269	1,415	10,32
13	ТБ-III-3	1,683	2,048	17,82
14	ТБ-IV-1	2,959	4,013	26,26
15	ТБ-V-2	2,552	3,394	24,81
16	ТБ-V-3	2,971	4,035	26,37
17	БВТ-IV-1	2,859	3,862	25,97
18	БВТ-V-2	2,64	3,529	25,19
19	БВТ-V-3	2,957	4,013	26,31

Для покращення візуального сприйняття отриманих результатів, на основі наведених у таблиці 4.1 даних було побудовано графіки значень коефіцієнта «зміцнення» бетону за двома теоріями пластичності (рис. 4.1), що дозволило

прослідкувати за схожістю характеру зміни цих значень в обох випадках застосування теорій пластичності.

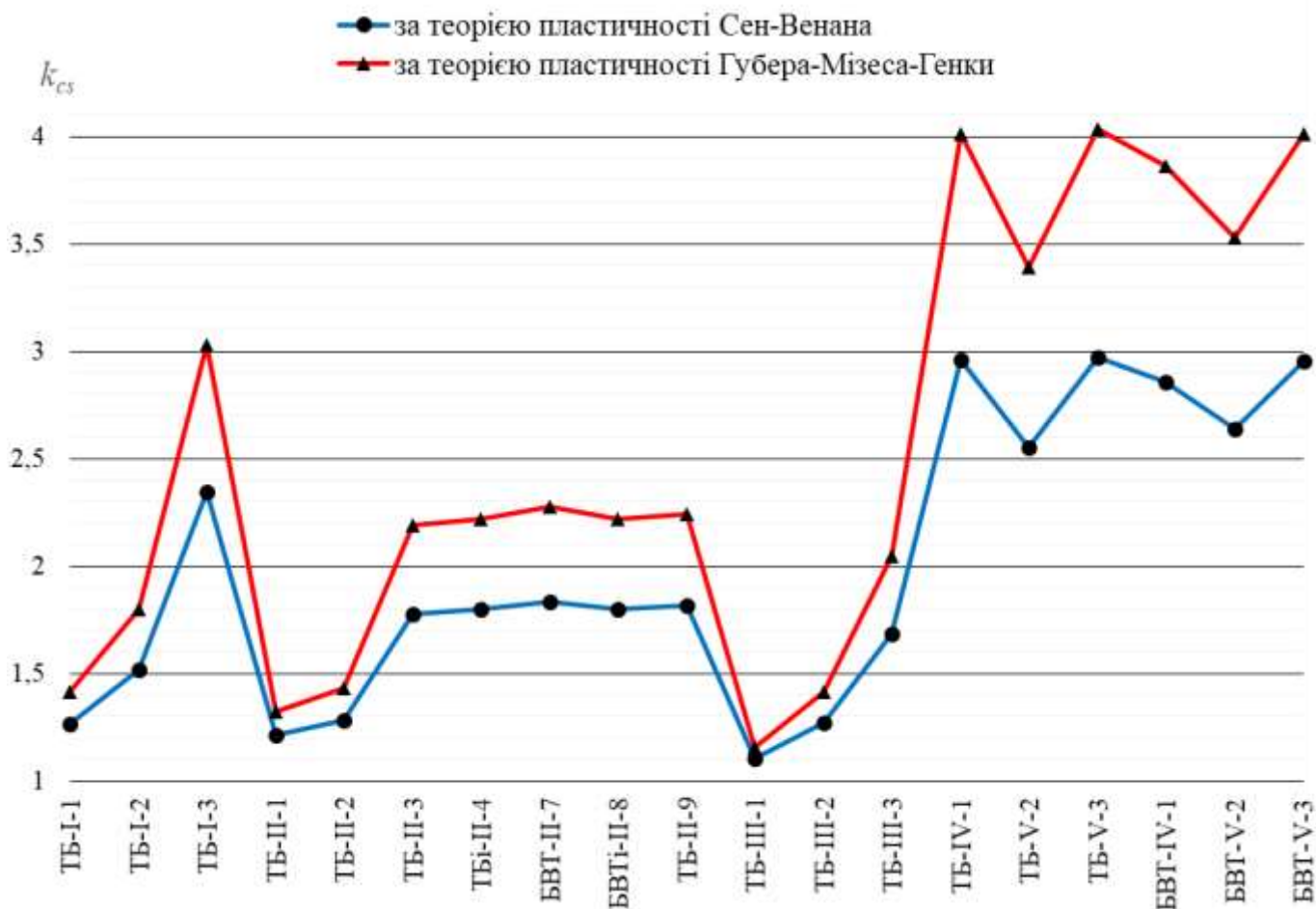


Рисунок 4.1 – Графіки значень коефіцієнта «зміцнення» бетону осердя, розраховані на основі теорій пластичності Сен-Венана та Губера-Мізеса-Генки

Розглянувши зображені графіки (рис. 4.1), можна зробити висновок про збіжність характерів зміни значень досліджуваного коефіцієнта «зміцнення» в залежності від характеристик розглядуваного зразка. Адже з рисунка 4.1 видно, що загальний обрис графіків значень згідно з теоріями пластичності Сен-Венана та Губера-Мізеса-Генки є майже однаковим.

В той же час дані таблиці 4.1 є доказом того факту, що розбіжність між значеннями коефіцієнта «зміцнення» бетону за різними теоріями пластичності є невеликою. Однак, аби визначити наскільки сильно вона впливає на кінцевий

результат розрахунку, потрібно провести аналогічні порівняння значень міцності, обчислених на основі теорій пластичності Сен-Венана та Губера-Мізеса-Генки.

4.2. Порівняння експериментальних значень міцності із теоретичними, розрахованими на основі теорії пластичності Сен-Венана

Для визначення наскільки результати аналітичного обчислення з використанням теорії Сен-Венана відрізняються від значень дійсної міцності трубобетону проведемо порівняння експериментальних значень міцності, що були отримані в результаті проведення натурних випробувань (розділ 3), із відповідними їм теоретичними значеннями, котрі було розраховано за формулою (2.47) на основі умови теорії пластичності Сен-Венана (2.42).

За величину відхилення аналітично отриманого значення міцності трубобетонного елемента від його експериментального відповідника приймаємо відносну похибку $\Delta_{N_{cv}}$, значення якої розраховуємо згідно із наступним математичним виразом:

$$\Delta_{N_{cv}} = \frac{N_y - N_{Rd}^{CB}}{N_y} \cdot 100\%, \quad (4.2)$$

де $\Delta_{N_{cv}}$ – відносна похибка значень міцності трубобетонного зразка за результатом експерименту та аналітичним розрахунком на основі теорії пластичності Сен-Венана, N_y – значення навантаження в ході експериментальних випробувань, котре відповідає граничному стану (табл. 3.3), N_{Rd}^{CB} – значення міцності випробуваного трубобетонного зразка, розраховане аналітично на основі умови теорії пластичності Сен-Венана за формулою (2.47).

Експериментальні значення міцності трубобетонних елементів, а також їхні аналітичні відповідники та значення відносних похибок для кожної з серій випробуваних зразків було занесено до таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Значення міцності зразків: експериментальні та за теорією пластичності Сен-Венана

№	Серія	N_y , кН	N_{Rd}^{CB} , кН	$\Delta_{N_{св}}$, %
1	ТБ-I-1	390,7	324,0	17,08
2	ТБ-I-2	576,3	476,0	17,41
3	ТБ-I-3	908,3	812,7	10,53
4	ТБ-II-1	491,7	415,4	15,52
5	ТБ-II-2	566,7	477,8	15,68
6	ТБ-II-3	960	834,0	13,12
7	ТБi-II-4	950	845,2	11,03
8	БВТ-II-7	893,3	868,2	2,81
9	БВТi-II-8	860	849,7	1,20
10	ТБ-II-9	843,3	859,7	-1,95
11	ТБ-III-1	533,3	353,2	33,77
12	ТБ-III-2	620	500,6	19,25
13	ТБ-III-3	980	864,7	11,76
14	ТБ-IV-1	320,3	315,2	1,60
15	ТБ-V-2	412,5	433,5	-5,09
16	ТБ-V-3	569,4	554,4	2,64
17	БВТ-IV-1	395,1	309,6	21,64
18	БВТ-V-2	441,3	470,0	-6,50
19	БВТ-V-3	522,2	554,5	-6,18

Як видно з останнього стовпчика таблиці 4.2, відмінність теоретично отриманих значень міцності від експериментальних не є надзвичайно великою. Також відмітимо, що більшість значень відносної похибки мають додатне значення, що свідчить про наявність запасу міцності розглядуваних елементів, тобто теоретичне (очікуване) значення не перевищує експериментальне (дійсне). А у випадках, коли відносна похибка набувала від'ємних значень, модуль цих значень був суттєво менший.

Якщо обчислити середнє арифметичне значення відносної похибки $\Delta_{N_{св}}^{сеп}$ для таблиці 4.2 за формулою:

$$\Delta_{N_{св}}^{сеп} = \frac{\sum |\Delta_{N_{св},i}|}{n}, \quad (4.3)$$

де $\Delta_{N_{cb,i}}$ – кожне i -те значення відносної похибки, а n – кількість таких значень, котра в нашому випадку дорівнює 19, то дізнаємося, що середнє значення відносної похибки складе $\Delta_{N_{cb}^{сep}} = 11,30\%$.

Аби прослідкувати візуально характер зміни значень міцності в обох розглядуваних випадках, було побудовано графіки цих значень, котрі представляємо у вигляді ламаних ліній на рисунку 4.2, де синім кольором зображено графік значень міцності, розрахованих аналітично на основі теорії пластичності Сен-Венана, а зеленим – графік значень міцності, отриманих в ході проведення лабораторних випробувань трубобетонних зразків.

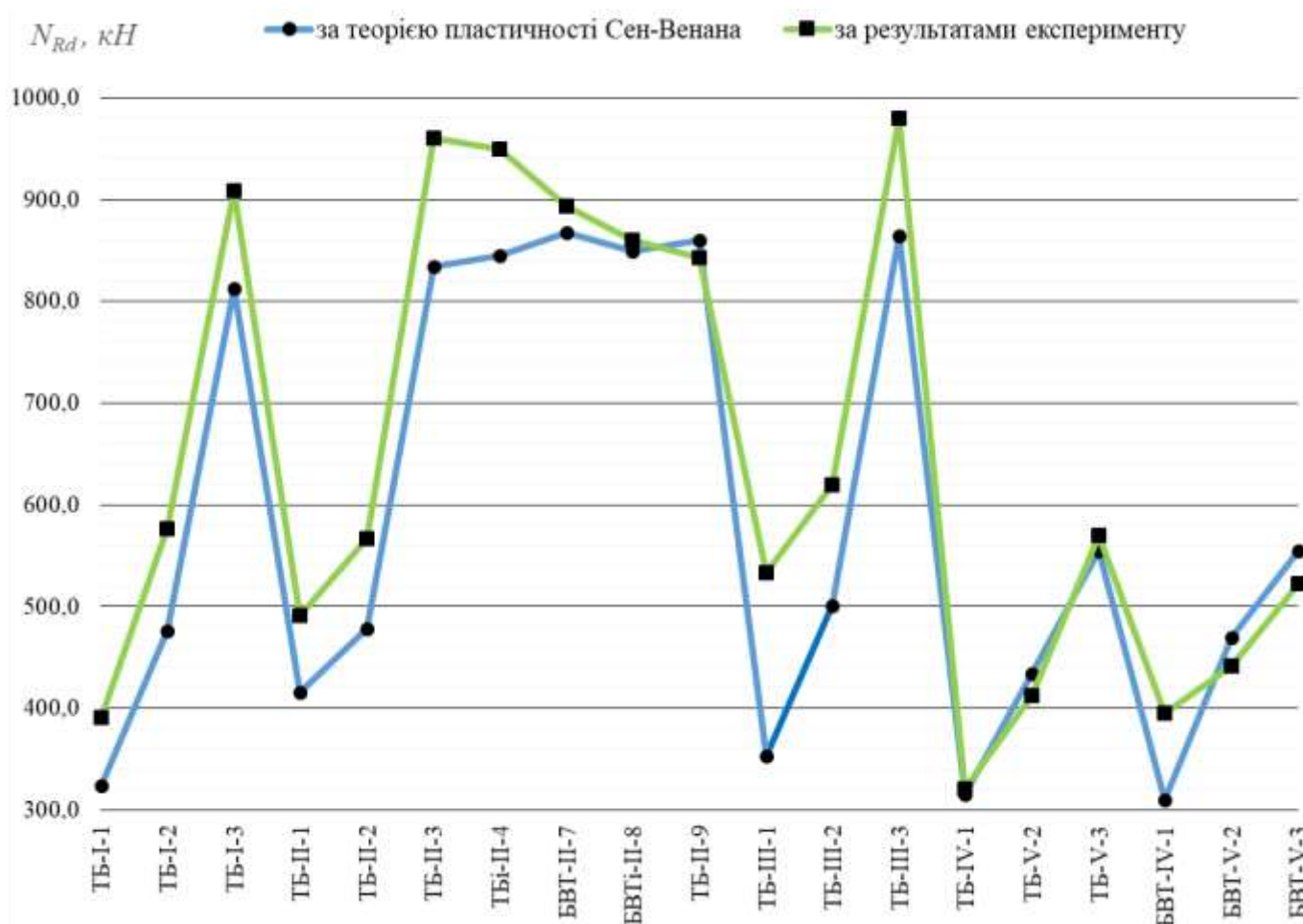


Рисунок 4.2 – Графіки значень міцності трубобетонних зразків за результатами експерименту та на основі теорії Сен-Венана

При детальному розгляді наведених графіків (рис. 4.2) стає зрозуміло, що крива обчислених за теорією Сен-Венана значень досить схоже повторює характер кривої експериментальних значень міцності розглядуваних елементів, що є доказом можливості використання описаного аналітичного розрахунку для обчислення значень міцності трубобетонних елементів.

4.3. Порівняння експериментальних значень міцності із теоретичними, розрахованими на основі теорії пластичності Губера-Мізеса-Генки

Аналогічно попередньому порівнянню (п. 4.2) проведемо порівняння значень міцності трубобетонних зразків, отриманих в ході лабораторних досліджень, із аналітично розрахованими за формулою (2.48), котру було сформовано на основі умови теорії пластичності Губера-Мізеса-Генки (2.43).

Так само, як і в попередньому пункті, для реалізації співставлення в математичній формі застосуємо величину відносної похибки значень міцності випробуваних трубобетонних елементів. В цьому випадку значення згаданої величини може бути обчисленим з наступного рівняння:

$$\Delta_{N_{\Sigma\sigma}} = \frac{N_y - N_{Rd}^{\Gamma M \Gamma}}{N_y} \cdot 100\%, \quad (4.4)$$

в якому $\Delta_{N_{\Sigma\sigma}}$ – відносна похибка значень міцності трубобетонного зразка за результатом експерименту та аналітичним розрахунком на основі теорії пластичності Губера-Мізеса-Генки, N_y – значення навантаження в ході експериментальних випробувань, котре відповідає граничному стану (табл. 3.3), $N_{Rd}^{\Gamma M \Gamma}$ – значення міцності випробуваного трубобетонного зразка, розраховане аналітично за формулою (2.48) на основі умови теорії пластичності Губера-Мізеса-Генки.

Всі використані при проведенні описаного порівняння матеріали: вихідні дані (експериментальні значення міцності) та розраховані значення (значення міцності за

теорією Губера-Мізеса-Генки, значення відносної похибки) – представимо нижче в табличній формі (табл. 4.3)

Таблиця 4.3 – Значення міцності зразків: експериментальні та за теорією пластичності Губера-Мізеса-Генки

№	Серія	N_y , кН	N_{Rd}^{GM} , кН	$\Delta_{N_{GM}}$, %
1	ТБ-I-1	390,7	344,6	11,81
2	ТБ-I-2	576,3	515,6	10,53
3	ТБ-I-3	908,3	909,7	-0,15
4	ТБ-II-1	491,7	438,8	10,76
5	ТБ-II-2	566,7	509,2	10,15
6	ТБ-II-3	960	918,7	4,31
7	ТБi-II-4	950	931,6	1,93
8	БВТ-II-7	893,3	958,4	-7,29
9	БВТi-II-8	860	936,6	-8,91
10	ТБ-II-9	843,3	947,9	-12,40
11	ТБ-III-1	533,3	366,0	31,36
12	ТБ-III-2	620	534,2	13,84
13	ТБ-III-3	980	948,7	3,19
14	ТБ-IV-1	320,3	351,2	-9,63
15	ТБ-V-2	412,5	479,4	-16,22
16	ТБ-V-3	569,4	613,9	-7,81
17	БВТ-IV-1	395,1	343,9	12,97
18	БВТ-V-2	441,3	518,5	-17,49
19	БВТ-V-3	522,2	614,3	-17,63

Після вивчення значень, котрі наведено у таблиці 4.3, можна зробити висновок, що для переважної більшості досліджуваних труобетонних зразків значення похибки експериментального та теоретичного значення міцності не є критично великим.

Проте у 9 випадках з 19 розглянутих відносна похибка набуває від'ємного значення, що сигналізує про ситуацію, коли розрахункове значення перевищує експериментальне. Такі ситуації можуть бути небезпечними, тож отримані дані є корисними для подальшого розгляду та дослідження.

Також для поглиблення розуміння проведеного порівняння важливою характеристикою є середня відносна похибка, котра відображає усереднене відхилення розрахункового значення міцності від отриманого в ході лабораторних випробувань.

Розрахуємо середнє значення відносної похибки (табл. 4.3) за формулою:

$$\Delta_{N_{змг}}^{сер} = \frac{\sum |\Delta_{N_{змг},i}|}{n}, \quad (4.5)$$

враховуючи, що $\Delta_{N_{змг}}^{сер}$ – середнє арифметичне значення відносної похибки значень міцності за результатом експерименту та за теорією пластичності Губера-Мізеса-Генки, $\Delta_{N_{змг},i}$ – кожне i -те значення відносної похибки значень міцності за результатом експерименту та за теорією пластичності Губера-Мізеса-Генки, n – кількість таких значень, котра в цьому випадку дорівнює 19.

Після застосування формули (4.5), використовуючи дані таблиці 4.3, було визначено, що середнє значення відносної похибки становить $\Delta_{N_{змг}}^{сер} = 10,97\%$.

Додатковим шляхом співставлення експериментальних значень міцності із теоретичними, розрахованими на основі теорії пластичності Губера-Мізеса-Генки, було обрано побудову графіків таких значень.

Рисунок 4.3 демонструє нам графіки значень міцності, де червоною ламаною лінією зображено графік значень міцності, отриманих в результаті проведення розрахунків, в основу яких покладено умову теорії пластичності Губера-Мізеса-Генки, а ламаною лінією зеленого кольору показано, в свою чергу, графік експериментальних значень міцності випробуваних у лабораторних умовах серій трубобетонних зразків.

На цьому зображенні (рис. 4.3) прослідковується схожість характерів зміни значень міцності обох графіків, що свідчить про можливість застосування розробленої методики розрахунку міцності нормального перерізу трубобетонних елементів.

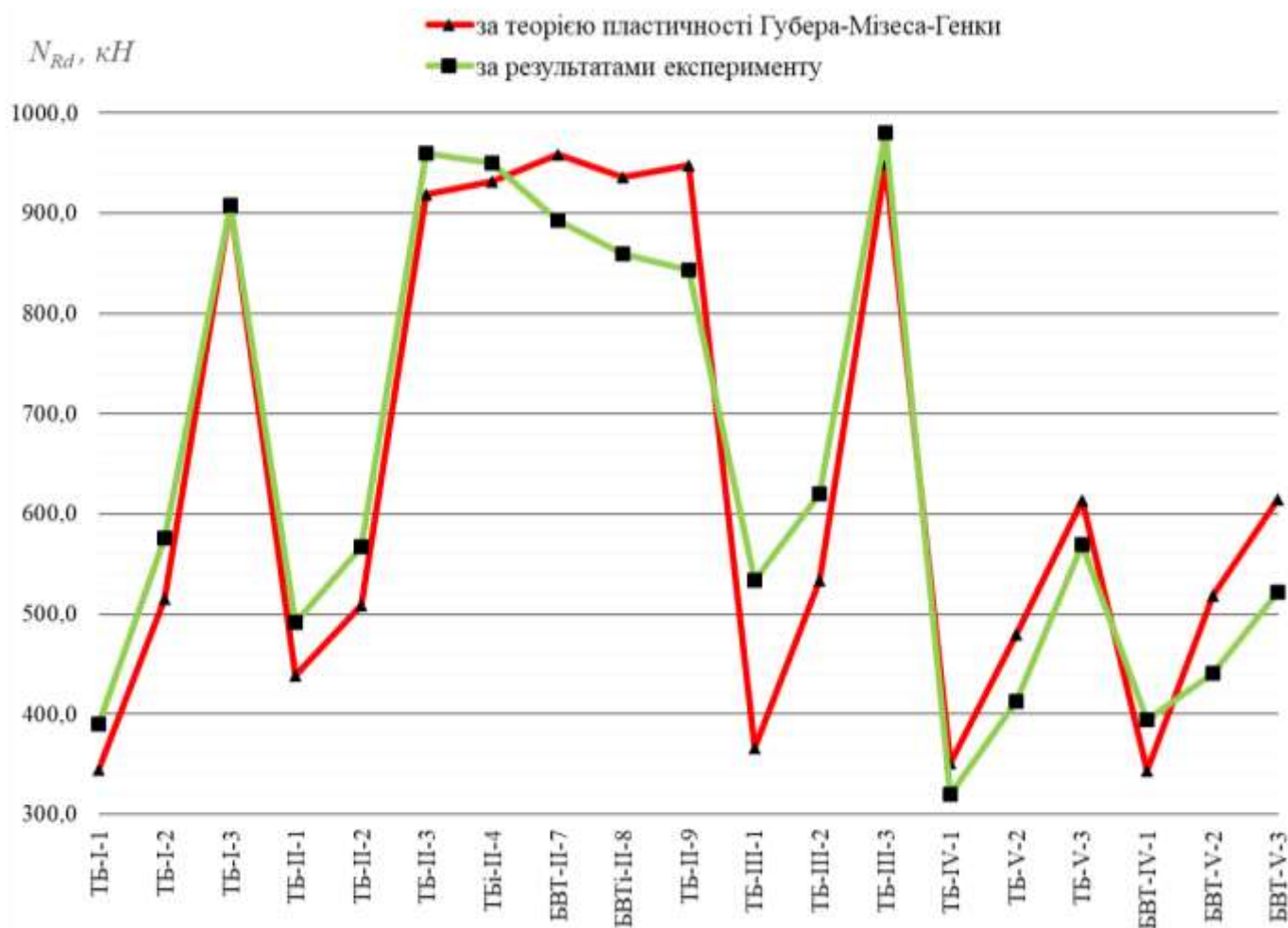


Рисунок 4.3 – Графіки значень міцності трубобетонних зразків за результатами експерименту та на основі теорії Губера-Мізеса-Генки

4.4. Порівняння точності отриманих розрахункових значень за двома розглянутими теоріями пластичності

Виконавши розрахунки значень міцності досліджуваних трубобетонних зразків за формулами (2.47) на основі теорії пластичності Сен-Венана та (2.48) на основі теорії пластичності Губера-Мізеса-Генки та маючи відповідні значення міцності цих зразків за результатами лабораторних досліджень (табл. 3.3), проведемо порівняння точності розрахункових значень міцності трубобетонних елементів на основі двох розглянутих теорій пластичності за допомогою співставлення графіків значень міцності (рис. 4.4).

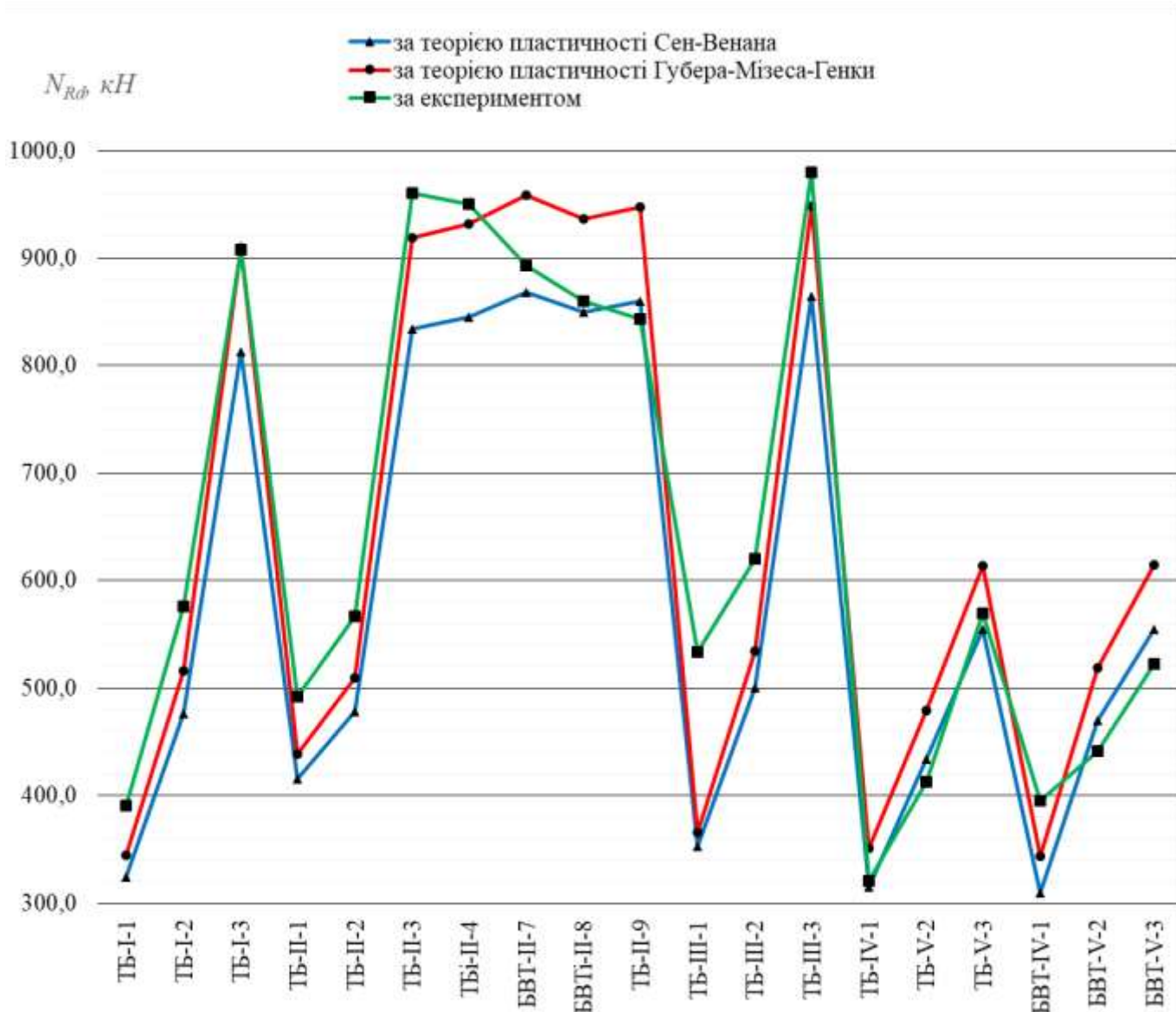


Рисунок 4.4 – Графіки значень міцності труробетонних зразків за результатами розрахунків та експериментальних досліджень

На рисунку 4.4 добре видно, що графік значень міцності за теорією пластичності Губера-Мізеса-Генки, котрий зображено червоною лінією, розташовується ближче до графіка експериментальних значень міцності, який має зелений колір, ніж синій графік значень міцності за теорією Сен-Венана.

Що стосується числового еквіваленту точності реалізованих розрахунків, то визначивши раніше відносні похибки проведених обчислень за кожною з розглядуваних теорій пластичності (табл. 4.2, 4.3), порівняємо значення цих похибок, аби зробити висновок стосовно точності кожної з теорій. Для цього запишемо розраховані раніше значення відносних похибок до таблиці 4.4 та

визначимо для кожної серії зразків котра із застосованих теорій пластичності дозволяє отримати меншу похибку значення міцності труобетонного елемента.

Таблиця 4.4 – Порівняння точності розрахунків за умовами теорій пластичності Сен-Венана та Губера-Мізеса-Генки

№	Серія	$\Delta_{N_{св}}$, % (табл. 4.2)	$\Delta_{N_{гмг}}$, % (табл. 4.3)	Випадки, коли точніша теорія Сен-Венана
1	ТБ-I-1	17,08	11,81	-
2	ТБ-I-2	17,41	10,53	-
3	ТБ-I-3	10,53	-0,15	-
4	ТБ-II-1	15,52	10,76	-
5	ТБ-II-2	15,68	10,15	-
6	ТБ-II-3	13,12	4,31	-
7	ТБі-II-4	11,03	1,93	-
8	БВТ-II-7	2,81	-7,29	+
9	БВТі-II-8	1,20	-8,91	+
10	ТБ-II-9	-1,95	-12,40	+
11	ТБ-III-1	33,77	31,36	-
12	ТБ-III-2	19,25	13,84	-
13	ТБ-III-3	11,76	3,19	-
14	ТБ-IV-1	1,60	-9,63	+
15	ТБ-V-2	-5,09	-16,22	+
16	ТБ-V-3	2,64	-7,81	+
17	БВТ-IV-1	21,64	12,97	-
18	БВТ-V-2	-6,50	-17,49	+
19	БВТ-V-3	-6,18	-17,63	+
Середнє відхилення		11,30	10,97	-

Проаналізуємо отримані в таблиці 4.4 результати. Для полегшення порівняння в останній колонці знаком «+» було відмічено випадки, для яких значення відносної похибки розрахунку міцності на основі теорії пластичності Сен-Венана було меншим за модулем, ніж відповідне значення при застосуванні умови теорії пластичності Губера-Мізеса-Генки. Тож, після такого співставлення, підбиваючи підсумок, зазначимо, що теорія Сен-Венана дала більш точні результати лише для 8 з 19 серій випробуваних зразків.

Середнє значення відхилень за теорією Сен-Венана також виявилось більшим за відповідне йому значення згідно з теорією пластичності Губера-Мізеса-Генки. Проте, що стосується середніх відхилень, то не зайвим буде відмітити, що за обраними теоріями пластичності середні значення відносних похибок склали 11,30% та 10,97%, тож в цьому випадку розбіжність є не надто значною для остаточного висновку про вищу точність однієї з обраних теорій.

З метою покращення візуального сприйняття отриманих результатів побудуємо графіки значень відносних похибок розрахованих значень міцності трубобетонних елементів на основі умов теорій пластичності Сен-Венана та Губера-Мізеса-Генки (рис. 4.5).

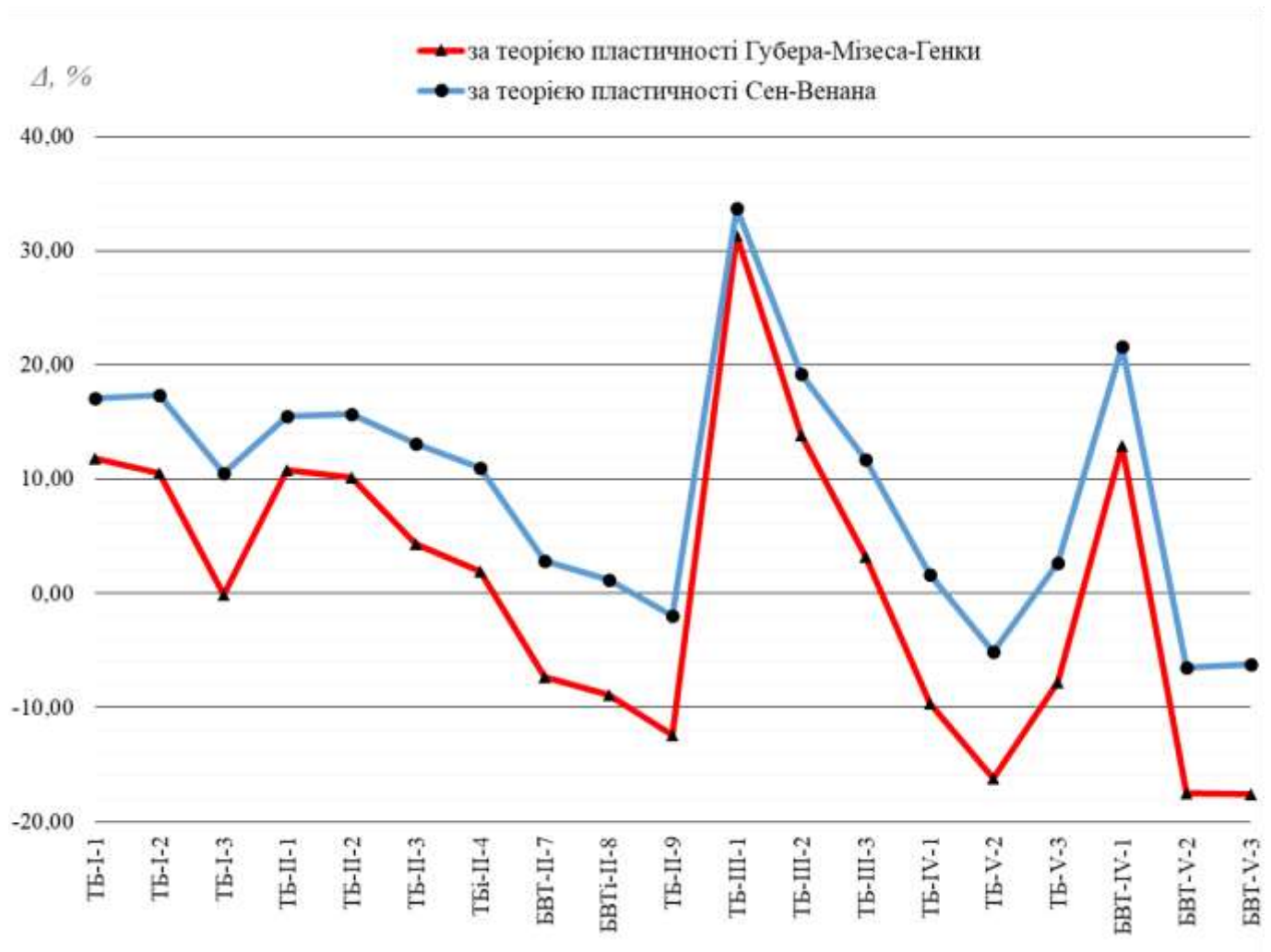


Рисунок 4.5 – Графіки значень відносних похибок розрахунків, проведених за теоріями пластичності Сен-Венана та Губера-Мізеса-Генки

На побудованих графіках чітко простежується схожість характерів зміни досліджуваних значень похибок, а також можна помітити, що червоний графік значень (за теорією пластичності Губера-Мізеса-Генки) розташовується ближче до нульової лінії, що свідчить про вищу точність розрахунків.

4.5. Висновки за розділом 4

На основі проведеного порівняння результатів теоретичного розрахунку з експериментальними даними сформулюємо наступні висновки:

1. Характери графіків значень коефіцієнта «зміцнення» бетону осердя, розраховані на основі теорій пластичності Сен-Венана та Губера-Мізеса-Генки, збігаються.
2. Середнє значення відносної похибки при розрахунку за теорією пластичності Сен-Венана склало $\Delta_{N_{cb}}^{cep} = 11,30\%$ тоді, як в умовах застосування теорії пластичності Губера-Мізеса-Генки воно становило $\Delta_{N_{cm}}^{cep} = 10,97\%$, що свідчить про схоже та відносно невелике значення відхилень для обох теорій.
3. Криві обчислених за теоріями Сен-Венана та Губера-Мізеса-Генки значень досить схоже повторюють характер кривої експериментальних значень міцності розглядуваних трубобетонних елементів, що є доказом можливості використання описаної методики аналітичного розрахунку для обчислення значень міцності трубобетонних елементів.
4. Обчислені значення відносних похибок доводять, що точність розрахунку за теорією пластичності Губера-Мізеса-Генки вища для 11 досліджуваних серій зразків з 19.
5. На побудованих графіках значень відносних похибок чітко простежується, що графік значень відносних похибок міцності за теорією пластичності Губера-Мізеса-Генки розташовується ближче до нульової лінії, що свідчить про вищу точність розрахунків.

ВИСНОВКИ ЗА МАГІСТЕРСЬКОЮ РОБОТОЮ

Виконавши повноцінне дослідження в рамках написання дипломної магістерської роботи на тему «Міцність бетону в замкнутому просторі металевої труби при стисканні» та підсумовуючи інформацію, що викладена у попередніх чотирьох розділах, можна зробити такі загальні висновки:

1. Виконано огляд літератури, систематизовано дані щодо галузей застосування сталезалізобетонних конструкцій, основних нормативних положень їхнього проектування, наукових досліджень стану розрахунків та теорій, котрі були застосовані в дослідженнях різних авторів, а також сформовано висновки щодо недоліків існуючих теорій розрахунку міцності трубобетонних елементів.
2. Обрано розрахункову схему та передумови, за якими вперше отримано формули несучої здатності трубобетонних конструкцій для стану, при якому бетон та сталь руйнуються одночасно.
3. Для виведення формул міцності трубобетонних елементів на деформаційній основі використано умови теорій пластичності Сен-Венана та Губера-Мізеса-Генки.
4. Додатково виведено формули для обчислення значень коефіцієнта «зміцнення» бетону за обома використаними теоріями пластичності.
5. З метою застосування на практиці виведених формул розроблено методику розрахунку несучої здатності трубобетонних конструкцій у вигляді блок-схеми реалізації на ПЕОМ.
6. Виконано розрахунок за розробленою методикою для перевірки можливості її застосування та складності використання.
7. Порівняння результатів теоретичного розрахунку з експериментальними даними показало, що виведені формули можуть бути застосовані для виконання розрахунків на практиці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции. [Действующие от 1986-01-01 до 2011-06-01]. Изд. офиц. Москва: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. 79 с.
2. СНиП II-23-81*. Нормы проектирования. Стальные конструкции. [Действующие от 1982-01-01 до 2013-06-01]. Изд. офиц. Москва: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. 96 с.
3. Тематика магістерських робіт на кафедрі будівельних конструкцій. *Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»*. URL: <https://nupp.edu.ua/page/tematika-magisterskikh-robit-na-kafedri-budivelnykh-konstruktsiy/>.
4. Павліков А.М., Кочкар'єв Д.В., Гарькава О.В., Андрієць К.І. Коефіцієнт зміцнення бетону трубобетонних елементів на основі умов пластичності. *BUILDING INNOVATIONS-2020*: матеріали III міжнар. азерб.-укр. наук.-практ. конф., м. Полтава, 1 чер. 2020 р. Полтава: НУПП, 2020. С. 156 – 158.
5. Павліков А.М., Кочкар'єв Д.В., Гарькава О.В., Андрієць К.І. Дослідження роботи залізобетону в замкнутому просторі металевої труби. *Академічна й університетська наука: результати та перспективи*: зб. наук. пр. XIII міжнар. наук.-практ. конф., м. Полтава, 10 груд. 2020 р. Полтава: НУПП, 2020. С. 252 – 256.
6. Павліков А.М., Гарькава О.В., Андрієць К.І. Аналіз міцності залізобетону в замкнутому просторі металевої труби при стисканні. *Збірник матеріалів: тези 73-ї наук. конф. професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів, м. Полтава, 21 квіт. – 13 трав. 2021 р.*: том 1. Полтава: НУПП, 2021. С.124 – 125.
7. Андрієць К.І. Аналіз міцності залізобетону в замкнутому просторі металевої труби : студ. наук. роб. Полтава: НУПП, 2021. 25 с.
8. Pavlikov A., Kochkarev D., Harkava O., Andriiets K. Strength analysis of reinforced concrete in a closed space of a metal pipe. *Industrial Machine Building, Civil Engineering: academic journal*, Issue 1 (54)' 2020. Полтава: 2020. P. 26 – 33.
9. Андрієць К., Михайлова Г., Мірошніченко К., Муха Д., Скриль Л. Конкурсний проект С-955 культурного центру у м. Київ. *STEEL FREEDOM 2021*. URL: https://steelfreedom.ua/ua/gallery_of_projects.

10. ДБН В.2.6-160:2010. Сталезалізобетонні конструкції. Основні положення. [Чинні від 2011-09-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, Державне підприємство «Укрархбудінформ», 2011. 55 с.

11. Стороженко Л.І., Семко О.В., Пенц В.Ф. Сталезалізобетонні конструкції: навч. посіб. Полтава: ПолтНТУ, 2005. 181 с.

12. Могилевцева И.М., Разумова О.В. Трубобетонный каркас – рациональный выбор при проектировании высотных зданий. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури* : зб. наук. праць. Дніпро: ПДАБА, 2012. Вип. 1. С. 45 – 53.

13. Рекомендации по проектированию монолитных железобетонных перекрытий со стальным профилированным настилом. Москва: Стройиздат, 1987. 41с.

14. Телебашня Гуанчжоу. *DOMAKS*. URL: <https://skdomaks.ru/novosti-industrii/teleshnyaya-guanchzhou/>.

15. Стороженко Л.І., Пенц В.Ф. Сталезалізобетонні конструкції. Конспект лекцій для студентів-магістрантів будівельних спеціальностей. Полтава: ПолтНТУ, 2019. 71 с.

16. Административно-жилой комплекс “Аркадиевская башня”. *Созидатель*. URL: <https://sozidatel.dp.ua/stroim/zhilye-kompleksy-2/azhk-arkadievskaya-bashnya/>.

17. Административно-жилой комплекс «Днепровский». *Созидатель*. URL: <https://sozidatel.dp.ua/stroim/zhilye-kompleksy-2/azhk-dneprovskij/>.

18. Беляев Н.А., Калафат К.В., Билык А.С., Постернак А.М. Проектирование сталежелезобетонных конструкций зданий в соответствии с Еврокодом 4 и национальными приложениями Украины. Киев: Украинский центр стального строительства, 2018. 453 с.

19. Pavlikov A., Harkava O., Prykhodko Y., Baryliak B. Highly constructed precast flat slab frame structural system of buildings and research of its slabs. *Proceedings of the International fib Symposium on Conceptual Design of Structures*, September 26–28, 2019. Madrid: 2019. 556 p.

20. Pavlikov A., Kochkarov D., Harkava O. Calculation of reinforced concrete members strength by new concept. *CONCRETE. Innovations in Materials, Design and Structures: Proceedings of the fib Symposium*. Krakow: 2019. P. 820-827.
21. Azizov T., Jurkowska N., Kochkarev D. Basis of calculation on torsion for reinforced concrete structures with normal cracks. *Proceedings of the fib Symposium 2019: Concrete. Innovations in Materials, Design and Structures*. Krakow: 2019. 2319 p.
22. Beicha D., Kanit T., Brunet Y., Imad A., Moumen A.E., Khelfaoui Y. Effective transverse elastic properties of unidirectional fiber reinforced composites. *Mechanics of Materials*. Vol. 102. 2016. P. 47-53.
23. Semko V., Voskobiinyk O., Skyba A., Shumeiko K., Prokhorenko D. Complex experimental investigation into light steel and steel-concrete composite structures made of Z-shaped sections under compound stress. *Metal constructions*. Vol. 20, №1. Donetsk: 2014. P. 65–76.
24. Min Yu, Xiaoxiong Zha, Jianqiao Ye, Yuting Li. A unified formulation for circle and polygon concretefilled steel tube columns under axial compression. *Engineering Structures*. 2013. Vol. 49. P. 1-10.
25. Koval'chuk S.B., Gorik A.V., Pavlikov A.N., Antonets A.V. Solution to the Task of Elastic Axial Compression-Tension of the Composite Multilayered Cylindrical Beam. *Strength of Materials*. 2019. Vol. 51, Iss. 2. P. 240-251.
26. Eurocode 4. Design of Composite Steel and Concrete Structures. Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings: ENV 1994-1-1:1992. Brussels: CEN, 1994. 180 p.
27. Steel, Concrete and Composite Bridges: Code of practice for design of composite bridges: BS 5400, Part 5. London: BSI, 2005. 48 p.
28. Limit states design of steel structures: CAN/CSA-S16.1-M89. Toronto: CSA, 1989. 147 p.
29. Load and Resistance Factor Design. AISC-LRFD. Chicago: AISC, 1994. 1993 p.
30. Building code requirements for reinforced concrete. ACI318R-92. Detroit: ACI, 1992. 353 p.

31. Стороженко Л.И., Сурдин В.М. Исследование трубобетонных элементов при осевом сжатии. *Строительные конструкции: сб. научн. работ.* Киев: НИИСК, Будівельник, 1969. Вып. XIII. С. 97 – 106.

32. Єфіменко В.І., Сурдін В.М. Вплив способів передачі зовнішнього навантаження на несучу здатність і деформативність сталобетонних елементів. *Проблеми теорії і практики залізобетону: зб. наук. праць.* Полтава: ПДТУ імені Юрія Кондратюка, 1977. С. 155 – 156.

33. Gulvanessian H., Calgaro I.-A., Holicky M. Designers' Guide to EN 1990 Eurocode: Basis of Struktural Design. London: Thomas Telford Publishing, 2002. 192 p.

34. Гвоздев А.А. Расчет несущей способности конструкций по методу предельного равновесия. Москва: Стройиздат, 1949. 248 с.

35. Бабич В.И., Кочкарёв Д.В. Расчет элементов железобетонных конструкций деформационным методом. *Бетон и железобетон, №2.* Москва: 2004. С.12-16.

36. Frederic P.M., Agnes F.V., McBrewster J. Hooke's Law. Saarbrücken: VDM Publishing, 2010. 92 p.

37. Hooke's law. *Wikipedia, the free encyclopedia.* URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Hooke%27s_law.

38. Atanackovic T.M., Guran A. Hooke's Law. *Theory of Elasticity for Scientists and Engineers.* New York: Springer Science and Business Media, 2000. P. 85-111.

39. Єрмоленко Д.А. Об'ємний напружено-деформований стан трубобетонних елементів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: спец. 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. Полтава: ПолтНТУ, 2012. 40 с.

40. Єрмоленко Д.А. Об'ємний напружено-деформований стан трубобетонних елементів: Монографія. Полтава: Видавець Шевченко Р.В., 2012. 316 с.

41. Воскобійник О.П. Сталезалізобетон: надійність, технічні стани, ризики: монографія. Донбас, 2014. 394 с.

42. Стороженко Л.І., Єрмоленко Д.А., Лапенко О.І. Труبوبетон: монографія. Полтава: ТОВ «АСМІ», 2010. 306 с.

43. Онищенко О.Г., Пічугін С.Ф., Онищенко В.О., Семко О.В., Стороженко Л.І., Ємельянова І.А., Ландар О.М. Високоєфективні технології та комплексні конструкції в будівництві: монографія. Полтава: ПФ «Форміка», 2009. С. 98-102.

44. ГОСТ 8732-78. Трубы стальные бесшовные. Сортамент. [Действующий от 1979-01-01]. Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2007. 10 с.

45. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання. [Чинні від 2017-07-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, Державне підприємство «Укрархбудінформ», 2016. 31 с.

46. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. [Чинні від 2011-06-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, Державне підприємство «Укрархбудінформ», 2010. 123 с.

47. Liaw D.G., Yang T.Y. Reliability of randomly imperfect beam-columns. Journal of Structural Engineering. Vol. 115, N 10. Reston, Virginia, United States : 1989. P. 2251-2270.

48. Johnson R.P. Composite Structures of Steel and Concrete. Volume 1: Beams, Slabs, Columns and Frames for Buildings. Oxford and Northampton : Alden Press Limited, 1994. 188 p.

49. Choi Dong-Ho, Kim Yong-Sik, Yoo Hoon. External Post-tensioning of Composite Bridges by a Rating Equation Considering the Increment of a Tendon Force Due to Live Loads. Steel Structures. vol.8. 2008. P. 109-118.

50. Aliawdin P., Urbanska K. Limit analysis of steel-concrete composite structures with slip. Civil and Environmental Engineering Reports, No. 7. 2011. P. 19-34.

51. Павліков А.М. Методичні вказівки до виконання магістерської роботи магістрантами спеціальності 8.06010101 – промислове і цивільне будівництво. Полтава : ПолтНТУ, 2012. 20 с.

52. Пермяков В.О., Гоголь М.В., Пелешко І.Д., Більський М.Р., Чайка Б.С. Проектування раціональних комбінованих металевих конструкцій. Львів : Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2005. 180 с.

53. Климов Ю.А., Пискун Р.А. К расчёту прочности сжатых железобетонных элементов, усиленных металлической обоймой [Текст]. Будівельні конструкції: зб. праць, № 54. Київ : НДІБК, 2001. С. 306-309.

54. Віхоть С.І. Міцність і деформативність комбінованих металевих конструкцій з урахуванням раціонального проектування: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.23.01 “Будівельні конструкції, будівлі та споруди”. Львів, 2015. 20 с.

ДОДАТОК А

Завдання на кваліфікаційну магістерську роботу

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ
ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»**

Навчально-науковий інститут архітектури, будівництва та землеустрою
 Кафедра, циклова комісія будівництва та цивільної інженерії
 Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр
 Напрямок підготовки 19 «Архітектура та будівництво»
(шифр і назва)
 Спеціальність 192 «Будівництво та цивільна інженерія»
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри БтаЦІ,
голова циклової комісії
Семко О.В.
 “__”__2021 року

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ**

студентці Андрієць Катерині Іванівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Міцність бетону в замкнутому просторі металевої труби при стисканні».

Керівник роботи Павліков Андрій Миколайович, д.т.н., професор,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджена наказом по інституту від “25” серпня 2021 року № 688-ф.а.

2. Строк подання студентом роботи 19 листопада 2021 року.

3. Вихідні дані до роботи:

3.1. Виконаний огляд літературних джерел з метою визначення галузі застосування та стану розрахунків трубобетонних конструкцій на час виконання роботи.

3.2. Розроблені ескізи розрахункових схем нормального перерізу трубобетонної колони.

3.3. Матеріали опублікованих раніше наукових тез, статей та наукової студентської роботи за тематикою роботи: див. «Публікації».

3.4. Систематизація та порівняльний аналіз попередньо виведених формул розрахунку міцності трубобетонних елементів.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): див. «Зміст».

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Плакати – 15 аркушів формату А1:

1-й аркуш – Об'єкт, предмет, мета і задачі роботи;

- 2, 3-й аркуші – Галузі застосування трубобетонних конструкцій;
4-й аркуш – Розрахункова схема нормального перерізу трубобетонного елемента;
5, 6-й аркуші – Виведення розрахункових формул;
7-й аркуш – Виведені розрахункові формули;
8-й аркуш – Блок-схема застосування методики розрахунку міцності трубобетонного елемента;
9-й аркуш – Приклад проектування будівлі з трубобетонними колонами, міцність яких розраховано за розробленою методикою;
10-й аркуш – Схема методики проведення натурних випробувань;
11-й аркуш – Порівняння значень коефіцієнта «зміцнення» бетону;
12-й аркуш – Порівняння експериментальних значень міцності трубобетонних елементів із теоретичними, розрахованими на основі теорії пластичності Сен-Венана;
13-й аркуш – Порівняння експериментальних значень міцності трубобетонних елементів із теоретичними, розрахованими на основі теорії пластичності Губера-Мізеса-Генки;
14-й аркуш – Порівняння точності отриманих розрахункових значень міцності трубобетонних елементів за двома розглянутими теоріями пластичності;
15-й аркуш – Висновки за магістерською роботою.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Усі розділи	Павліков А.М., зав. кафедри будівельних конструкцій		

7. Дата видачі завдання 29 липня 2021 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<u>Аркуш 1, Вступ</u>	01.09.21 – 10.09.21	
2	<u>Аркуші 2, 3, Розділ 1</u>	11.09.21 – 18.09.21	
3	<u>Аркуші 4, 5, 6, 7, 8, 9, Розділ 2</u>	19.09.21 – 07.10.21	
4	<u>Аркуш 10, Розділ 3</u>	08.10.21 – 22.10.21	
5	<u>Аркуші 11, 12, 13, 14, Розділ 4</u>	23.10.21 – 12.11.21	
6	<u>Аркуш 15, Висновки</u>	12.11.21 – 19.11.21	

Студент _____ Андрієць К.І.
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Павліков А.М.
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Публікації (до п. 3 завдання)

1. Павліков А.М., Кочкаръов Д.В., Гарькава О.В., Андрієць К.І. Коефіцієнт зміцнення бетону трубобетонних елементів на основі умов пластичності. *BUILDING INNOVATIONS-2020*: матеріали III міжнар. азерб.-укр. наук.-практ. конф., м. Полтава, 1 чер. 2020 р. Полтава: НУПП, 2020. С. 156 – 158.
2. Павліков А.М., Гарькава О.В., Андрієць К.І. Аналіз міцності залізобетону в замкнутому просторі металевої труби при стисканні. *Збірник матеріалів*: тези 73-ї наук. конф. професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів, м. Полтава, 21 квіт. – 13 трав. 2021 р.: том 1. Полтава: НУПП, 2021. С.124 – 125.
3. Pavlikov A., Kochkarev D., Harkava O., Andriiets K. Strength analysis of reinforced concrete in a closed space of a metal pipe. *Industrial Machine Building, Civil Engineering*: academic journal, Issue 1 (54)' 2020. Полтава: 2020. P. 26 – 33.
4. Павліков А.М., Кочкаръов Д.В., Гарькава О.В., Андрієць К.І. Дослідження роботи залізобетону в замкнутому просторі металевої труби. *Академічна й університетська наука: результати та перспективи*: зб. наук. пр. XIII міжнар. наук.-практ. конф., м. Полтава, 10 груд. 2020 р. Полтава: НУПП, 2020. С. 252 - 256.
5. Андрієць К.І. Аналіз міцності залізобетону в замкнутому просторі металевої труби : студ. наук. роб. Полтава: НУПП, 2021. 25 с.
6. Андрієць К., Михайлова Г., Мірошніченко К., Муха Д., Скриль Л. Конкурсний проект С-955 культурного центру у м. Київ. *STEEL FREEDOM 2021*. URL: https://steelfreedom.ua/ua/gallery_of_projects.

Зміст (до п. 4 завдання)

Вступ.....	.....
1. Огляд літератури за темою магістерської роботи.....	.....
1.1 Галузі застосування трубобетонних конструкцій.....	.....
1.2 Стан розрахунків трубобетонних конструкцій.....	.....
1.3 Теорії, які застосовано в дослідженнях.....	.....
1.4 Висновки за розділом 1.....	.....
2. Розрахунок міцності нормального перерізу трубобетонного елемента.....	.....
2.1 Постулати та розрахункова схема.....	.....
2.2 Виведення розрахункових формул.....	.....
2.3 Методика проведення розрахунку за виведеними формулами.....	.....
2.4 Приклад розрахунку міцності за розробленою методикою.....	.....
2.5 Висновки за розділом 2.....	.....
3. Експериментальні дослідження міцності нормального перерізу трубобетонного елемента.....	.....
3.1 Структурна схема та технологія виготовлення зразків.....	.....
3.2 Методика проведення натурних випробувань для виготовлення зразків.....	.....
3.3 Результати проведених випробувань.....	.....
3.4 Висновки за розділом 3.....	.....
4. Порівняння результатів теоретичного розрахунку з експериментальними даними.....	.....
4.1 Порівняння значень коефіцієнта «зміцнення» бетону, розрахованих за різними теоріями пластичності.....	.....
4.2 Порівняння експериментальних значень міцності із теоретичними, розрахованими на основі теорії пластичності Сен-Венана.....	.....
4.3 Порівняння експериментальних значень міцності із теоретичними, розрахованими на основі теорії пластичності Губера-Мізеса-Генки.....	.....
4.4 Порівняння точності отриманих розрахункових значень за двома розглянутими теоріями пластичності.....	.....
4.5 Висновки за розділом 4.....	.....
Висновки за магістерською роботою.....	.....
Список використаних джерел.....	.....
Додаток А.....	.....
Додаток Б.....	.....
Додаток В.....	.....

ДОДАТОК Б



ДИПЛОМ

*III ступеня**НАГОРОДЖУЄТЬСЯ*

*студентка Національного університету «Полтавська політехніка
імені Юрія Кодратюка»*

*Андрієць Катерина Іванівна**за III місце*

*у Всеукраїнському конкурсі студентських наукових
робіт з галузей знань і спеціальностей у 2020/2021 н.р.
спеціальність «Будівництво та цивільна інженерія»*

*Ректор**П.М. Куліков**Голова галузевої конкурсної комісії**В.О. Плоский*

ДОДАТОК В

Steel
Freedom

ДИПЛОМ

НАГОРОДЖУЄТЬСЯ

Андрієць
Катерина

КОМАНДА: С-955

ПІВФІНАЛІСТ

В НАЦІОНАЛЬНОМУ АРХІТЕКТУРНОМУ
СТУДЕНТСЬКОМУ КОНКУРСІ STEEL FREEDOM 2021

В КАТЕГОРІІ СТВОРЕННЯ ПРОЕКТУ
КУЛЬТУРНОГО ЦЕНТРУ У М. КИЇВ

ВИКОНАВЧИЙ ДИРЕКТОР АСОЦІАЦІЇ УЦОБ
ВЯЧЕСЛАВ КОЛІСНИК

Ukrainian

Об'єкт, предмет, мета і задачі роботи

Об'єкт дослідження - стискання трубобетонного елемента.

Предмет дослідження - міцність бетонного осердя трубобетонного елемента при його стисканні.

Мета роботи - дослідити міцність бетону трубобетонного елемента при стисканні та розробити методику розрахунку міцності нормального перерізу трубобетонного елемента з урахуванням явища «зміцнення» бетону.

Задачі роботи:

- виконати огляд літератури за обраним напрямом роботи;
- систематизувати дані щодо галузей застосування сталезалізобетонних конструкцій;
- вивчити основні нормативні положення з проектування сталезалізобетонних конструкцій;
- проаналізувати наукові дослідження щодо стану розрахунків трубобетонних конструкцій;
- ознайомитись з теоріями, що були застосовані в дослідженнях різних авторів;
- зробити висновки щодо недоліків існуючих теорій розрахунку міцності трубобетонних елементів;
- обрати розрахункову схему та передумови для реалізації власних досліджень;
- вивести розрахункові формули для визначення міцності нормального перерізу трубобетонного елемента;
- розробити методику розрахунку міцності нормального перерізу трубобетонного елемента на основі виведених розрахункових залежностей;
- виконати розрахунок за розробленою методикою, аби перевірити можливість її застосування та складність використання;
- отримати результати експериментальних досліджень, необхідні для оцінювання можливості застосування розробленої методики на практиці;
- проаналізувати всі результати проведених досліджень міцності бетону трубобетонного елемента при стисканні;
- сформулювати остаточні висновки за роботою.

					2021		601-БП.20107.ДП			
							Міцність бетону в замкнутому просторі металевої труби при стисканні			
Зм	Кільк	Арж	Док	Підпис	Дата		Об'єкт, предмет, мета і задачі роботи	Стадія	Арж	Архив
Виконала	Андрусів К.І.							ДП	1	15
Перевірив	Таблаков А.М.									
Н. Контр.	Семко О.В.									
Н. Контр.	Семко О.В.									

Галузі застосування трубобетонних конструкцій

Будівництво мостів

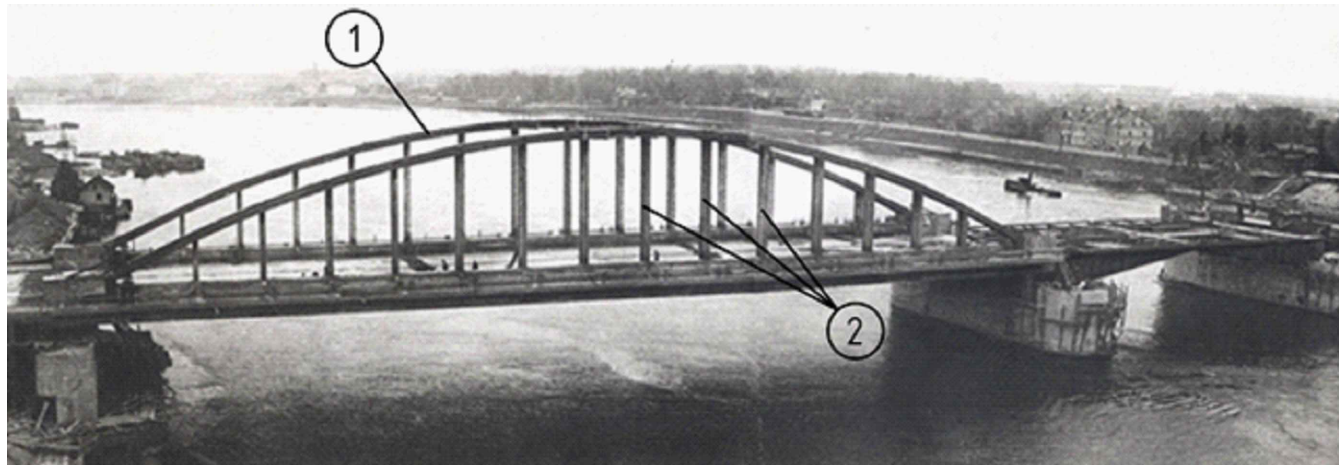
Будівництво споруд



а)



б)



в)

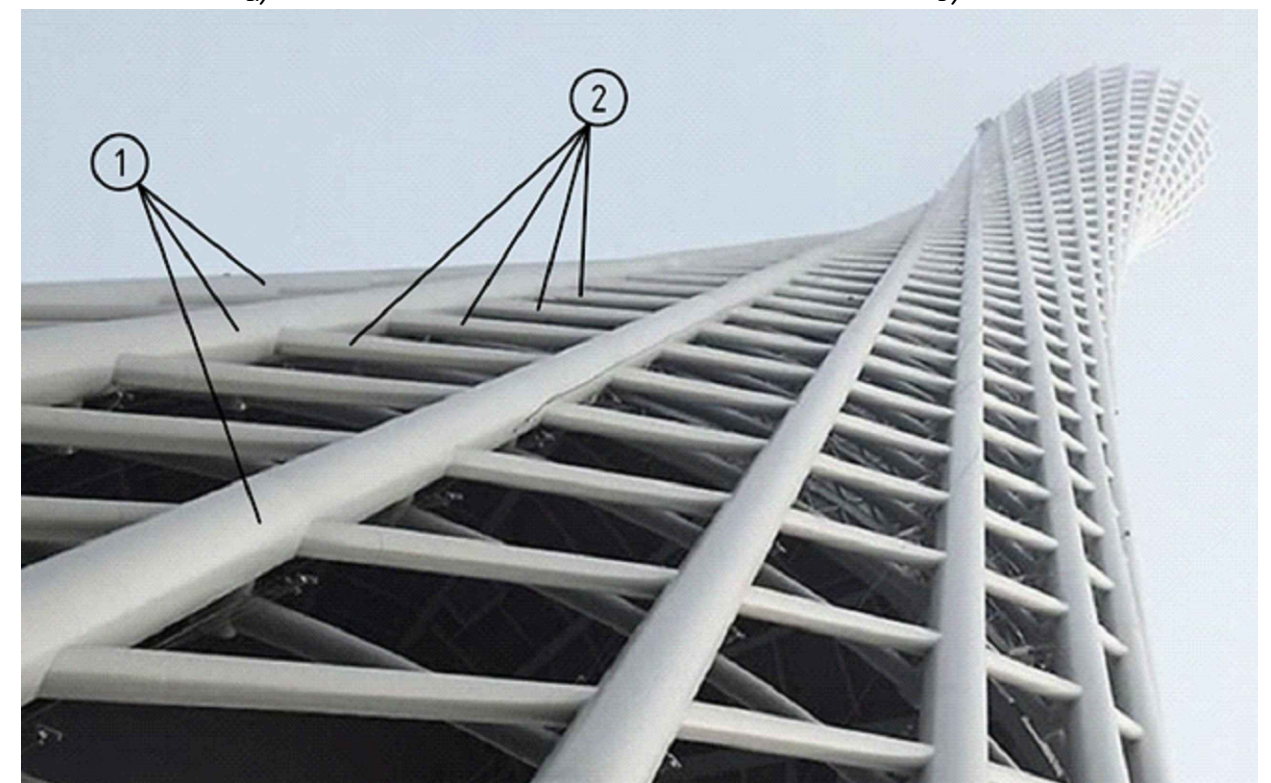
Старий Володарський міст через р. Нева, побудований із застосуванням трубобетонних елементів:
а) загальний вигляд; б) доставка прольоту при будівництві; в) встановлений проліт;
1 - верхній параболічний пояс з трубобетону; 2 - стійки безрозкісної ферми



а)



б)



в)

Телевізійна вежа з трубобетонних елементів, Гуанчжоу (Китай):
а) загальний вигляд; б) верхня частина вежі; в) конструкція вежі;
1 - трубобетонні колони; 2 - овальні кільця

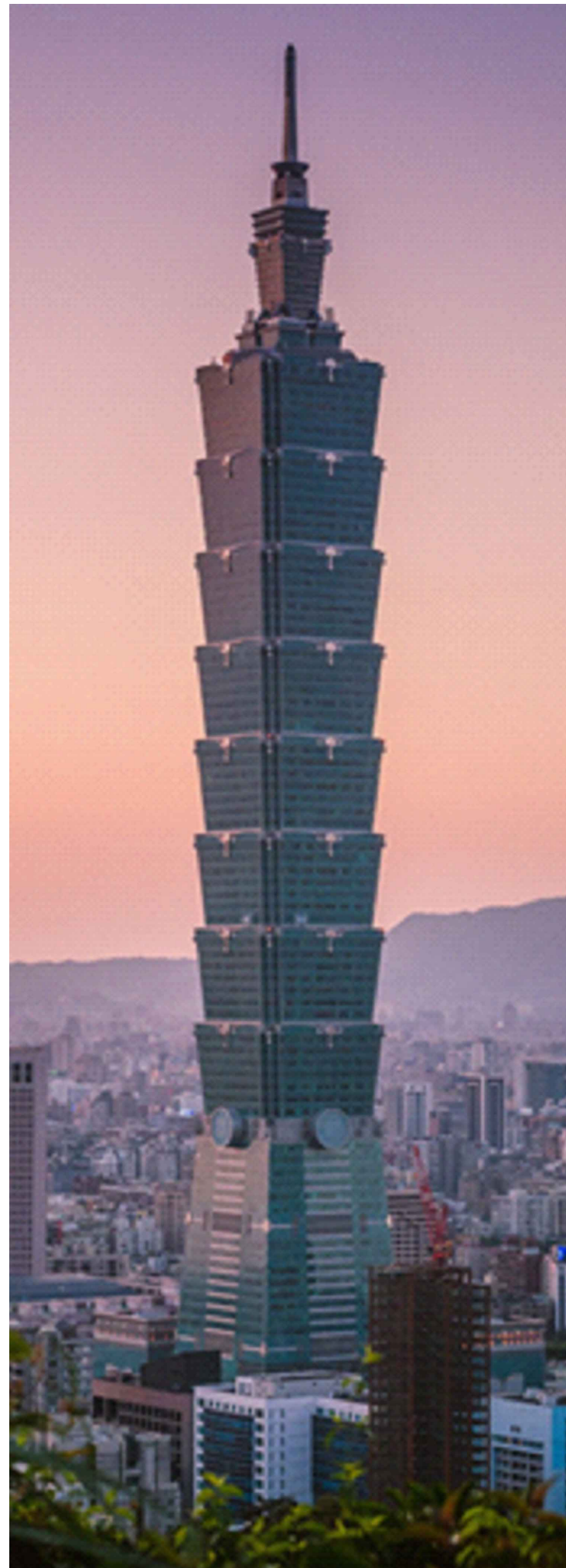
Промислове будівництво

Сталезалізобетонний каркас багатоповірхової виробничої будівлі фірми Зіменс, м. Берлін



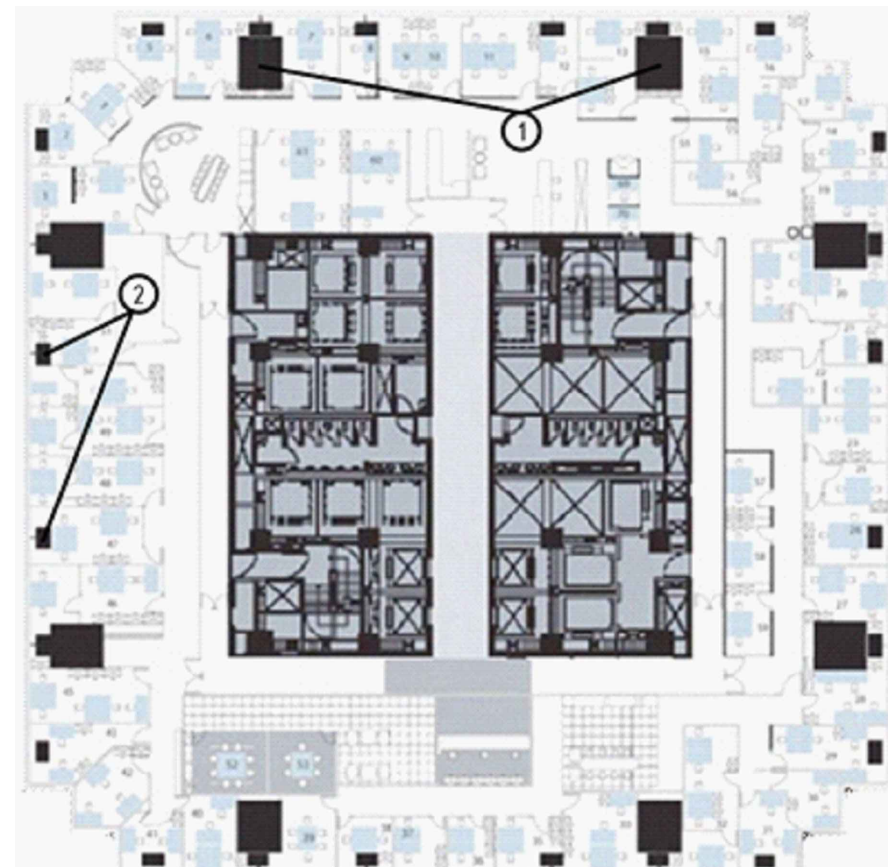
						2021	601-БП.20107.ДП				
						Міцність бетону в замкнутому просторі металевої труби при стисканні					
Зм	Кільк	Арж	Док	Підпис	Дата	Галузі застосування трубобетонних конструкцій			Стадія	Аркуш	АркушВ
Виконала	Андрусів К.І.					ДП			2	15	
Перевірив	Табіков А.М.					Будівництво мостів, споруд та промислове будівництво			Національний університет "Львівська політехніка" імені Юрія Кондратюка" Кафедра БТЦІ		
Н. Контр.	Семко О.В.										
Н. Контр.	Семко О.В.										

Галузі застосування трубобетонних конструкцій



а)

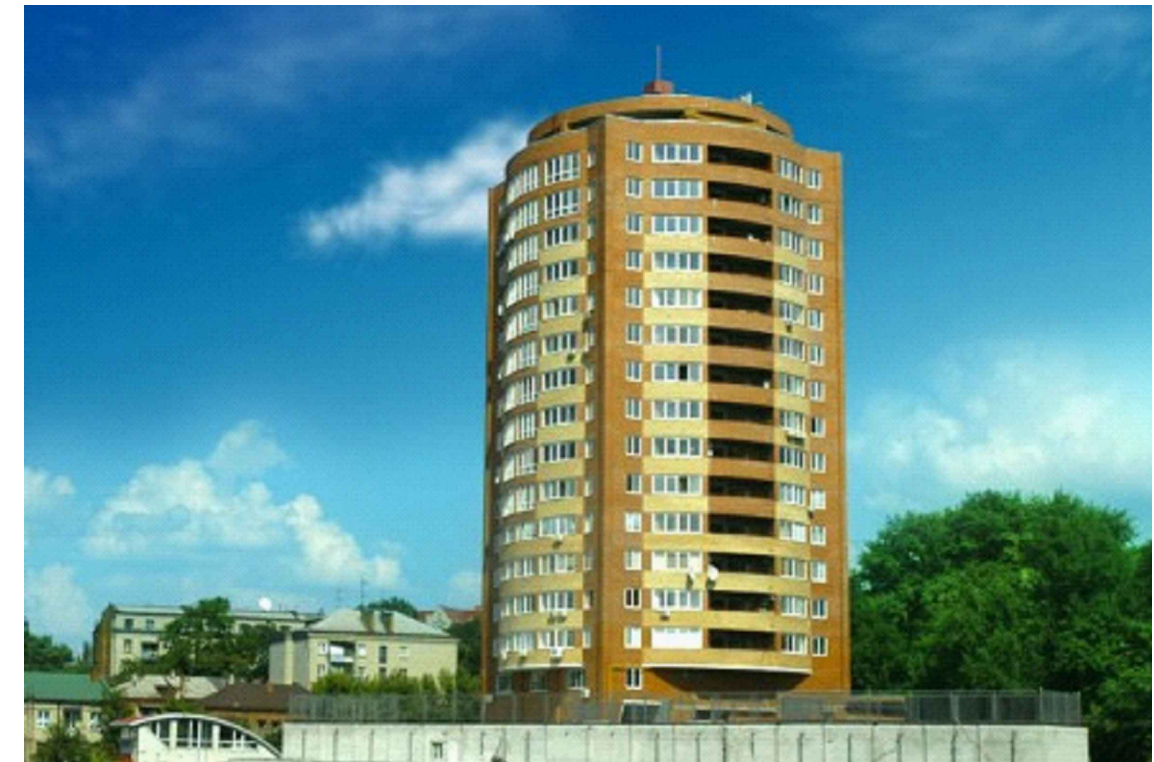
Цивільне будівництво



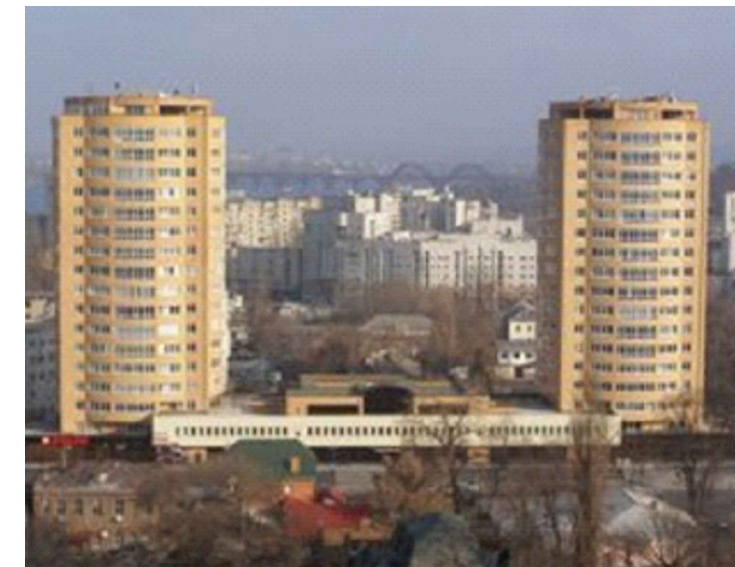
б)

Висотна будівля Тайпей 101 з комбінованими сталезалізобетонними несучими конструкціями в Тайвані (Китай):

а) загальний вигляд; б) план поверху;
1 - основні колони з трубобетону;
2 - додаткові колони



Будівля з трубобетонних конструкцій адміністративно-житлового комплексу «Аркадієвська вежа» (Україна)



а)

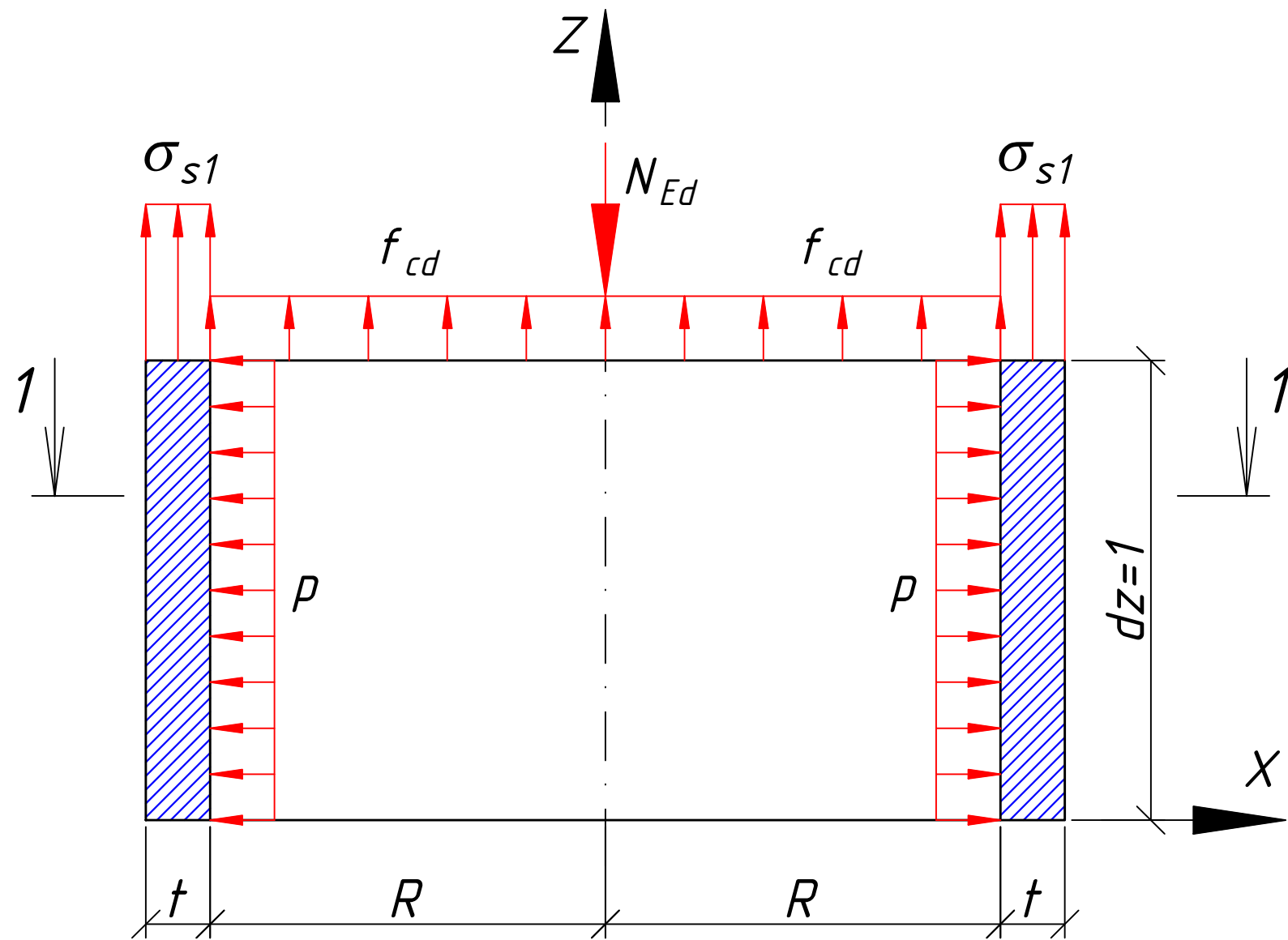


б)

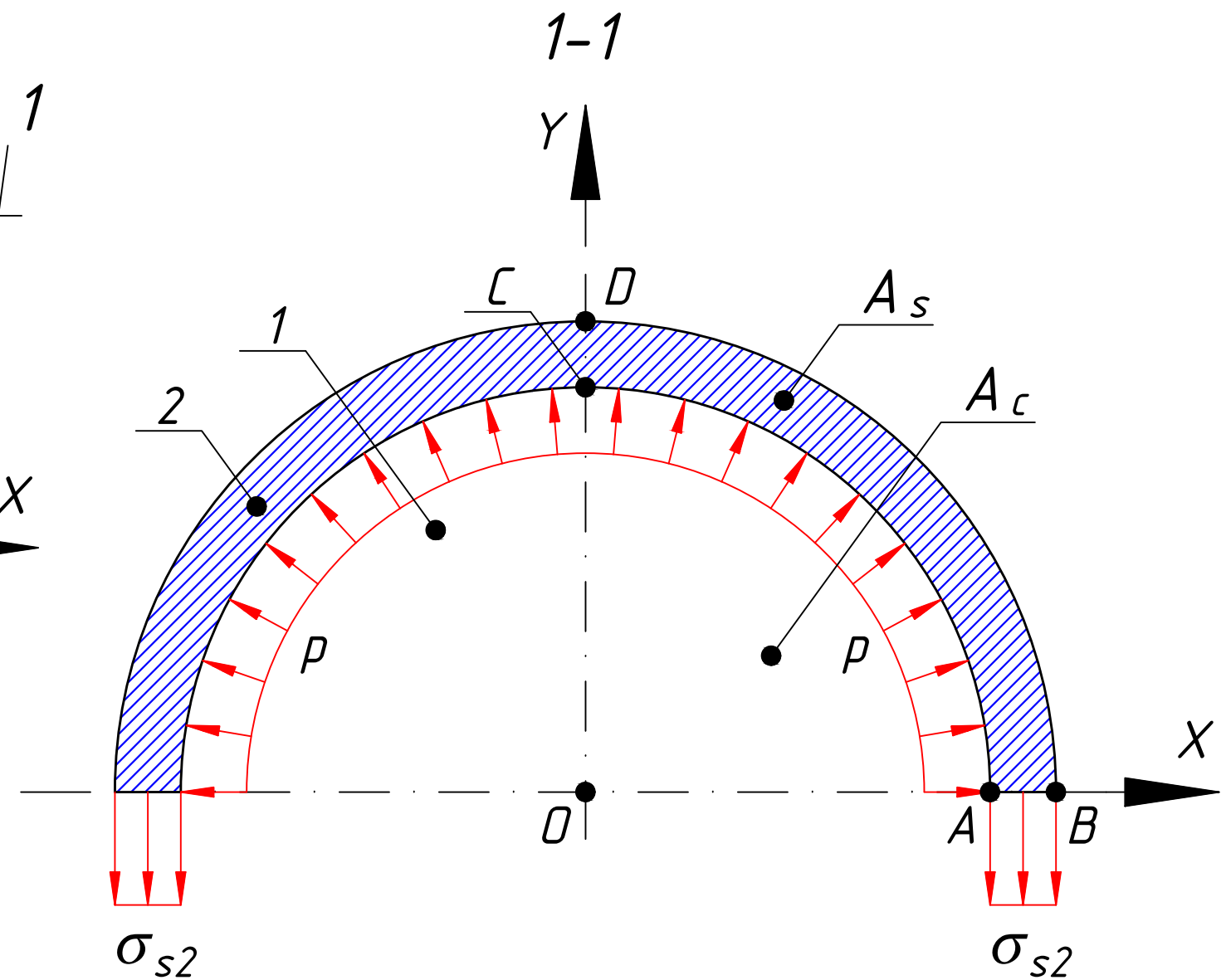
Будівлі адміністративно-житлового комплексу (АЖК) «Дніпровський» із трубобетонним каркасом:
а) загальний вигляд; б) зведення з використанням трубобетонного каркасу

					2021	601-БП.20107.ДП		
					Міцність бетону в замкнутому просторі металевої труби при стисканні			
Зм	Кільк	Арх	Док	Підпис	Дата	Галузі застосування трубобетонних конструкцій		
Виконала	Андрусів К.І.					Стадія	Аркуш	АркушВ
Перевірив	Габлюк А.М.					ДП	3	15
						Цивільне будівництво		
Н. Контр.	Семко О.В.				Національний університет «Львівська політехніка» імені Юрія Кондратюка			
Н. Контр.	Семко О.В.				Кафедра БТМЦІ			

Розрахункова схема нормального перерізу трубобетонного елемента



Вертикальний перетин нормального перерізу круглого трубобетонного елемента



Горизонтальний перетин 1-1 нормального перерізу круглого трубобетонного елемента

						2021	601-БП.20107.ДП				
						Міцність бетону в замкнутому просторі металевої труби при стисканні					
Зм	Кільк	Арж	Док	Підпис	Дата	Розрахункова схема нормального перерізу трубобетонного елемента			Стадія	Аркуш	Аркушів
Виконав	Андрусів К.І.					ДП			4	15	
Перевірив	Таблюк А.М.					Будівництво мостів, споруда та промислове будівництво			Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка" Кафедра БТД		
Н. Контр.	Семко О.В.										
Н. Контр.	Семко О.В.										

Виведення розрахункових формул

Основна умова несучої здатності:

$$N_{Ed} \leq N_{Rd} \quad (1)$$

$$\text{В (1)} \quad N_{Rd} = A_c (f_{cd} + 4 \cdot p) + A_s \sigma_{s1} \quad (2)$$

Зважаючи на рівність дії меридіонального тиску бетону кільцевим напруженням, які виникають у трубі, а саме:

$$\sigma_{s2} \cdot t \cdot dz = p \cdot R \cdot dz, \quad (3)$$

отримано формулу меридіонального тиску бетону:

$$p = \frac{\sigma_{s2} \cdot t}{R} \quad (4)$$

Підставивши (4) в (2), отримано формулу міцності:

$$N_{Rd} = A_c \left(f_{cd} + 4 \cdot \frac{\sigma_{s2} \cdot t}{R} \right) + A_s \sigma_{s1} \quad (5)$$

За даними плаката 4 зрозуміло, що співвідношення площ перерізу труби та осердя має вигляд:

$$\frac{A_s}{2A_c} = \frac{t}{R} \quad (6)$$

Тож, застосувавши (6) разом із (5), отримано:

$$N_{Rd} = A_c f_{cd} + 2 \cdot \sigma_{s2} \cdot A_s + A_s \sigma_{s1} \quad (7)$$

Далі вводимо коефіцієнт співвідношення напружень:

$$\frac{\sigma_{s2}}{\sigma_{s1}} = k \quad (8)$$

Підстановка напружень з (8) у (7) показала, що

$$N_{Rd} = A_c f_{cd} + (2k + 1) A_s \sigma_{s1} \quad (9)$$

					2021	601-БП.20107.ДП		
						Міцність бетону в замкнутому просторі металевої труби при стисканні		
Зм	Кільк	Арж	Док	Підпис	Дата	Виведення розрахункових формул	Старія	Аркуш
Виконав	Андрусів К.І.					ДП	5	15
Перевірив	Габлюк А.М.					Формули (1) - (9)		
Н. Контр.	Семко О.В.					Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка" Кафедра БТМ		
Н. Контр.	Семко О.В.							

Виведення розрахункових формул

Рівність переміщень труби та осердя:

$$u_s = u_c. \quad (10)$$

У рівності (10) переміщення сталевих труби:

$$u_s = \left(\frac{\sigma_{s2} - \nu \sigma_{s1}}{E_s} \right) R, \quad (11)$$

а переміщення бетонного осердя:

$$u_c = \left(\frac{\sigma_{s2}}{E_c} \cdot \frac{t}{R} \right) R. \quad (12)$$

Вводимо коефіцієнт співвідношення модулів деформацій:

$$\alpha_s = \frac{E_s}{E_c}. \quad (13)$$

Меридіональні напруження з (10), враховуючи (11) - (13):

$$\sigma_{s2} = \frac{\nu}{1 - 2\alpha_s \frac{t}{D}} \sigma_{s1}. \quad (14)$$

З (8) та (14) коефіцієнт співвідношення напружень:

$$k = \frac{\nu}{1 - 2\alpha_s \frac{t}{D}}. \quad (15)$$

Підставивши у (9) вираз (15), отримано:

$$N_{Rd} = A_c f_{cd} + \left(\frac{2\nu}{1 - 2\alpha_s \frac{t}{D}} + 1 \right) A_s \sigma_{s1}. \quad (16)$$

Обираємо як додаткові рівняння умови пластичності:

Сен-Венана:

$$\sigma_{s1} + \sigma_{s2} = f_{yd}, \quad (17)$$

Губера-Мізеса-Генки:

$$\sigma_{s1}^2 - \sigma_{s1} \sigma_{s2} + \sigma_{s2}^2 = f_{yd}^2. \quad (18)$$

						2021	601-БП.20107.ДП				
						Міцність бетону в замкнутому просторі металевої труби при стисканні					
Зм	Кільк	Арх	Док	Підпис	Дата	Виведення розрахункових формул			Стадія	Архив	Архив
Виконала	Андрусів К.І.					ДП			6	15	
Перевірив	Габлюк А.М.					Формули (10) - (18)			Національний університет "Львівська політехніка" імені Юрія Кондратюка Кафедра БТМЦ		
Н. Контр.	Семко О.В.										
Н. Контр.	Семко О.В.										

Виведені розрахункові формули

Формула розрахунку міцності нормального перерізу із використанням коефіцієнта «зміцнення» бетону:

$$N_{Rd} = k_{cs} A_c f_{cd} + A_s f_{yd}. \quad (19)$$

Формули розрахунку за різними теоріями пластичності:

коефіцієнта «зміцнення» бетону за теорією Сен-Венана:

$$k_{cs} = 1 + \frac{4k}{k+1} \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \frac{t}{D}, \quad (20)$$

міцності трубобетонного елемента за теорією Сен-Венана:

$$N_{Rd} = \left(1 + \frac{4k}{k+1} \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \frac{t}{D} \right) A_c f_{cd} + A_s f_{yd}, \quad (21)$$

коефіцієнта «зміцнення» бетону за теорією Губера-Мізеса-Генки:

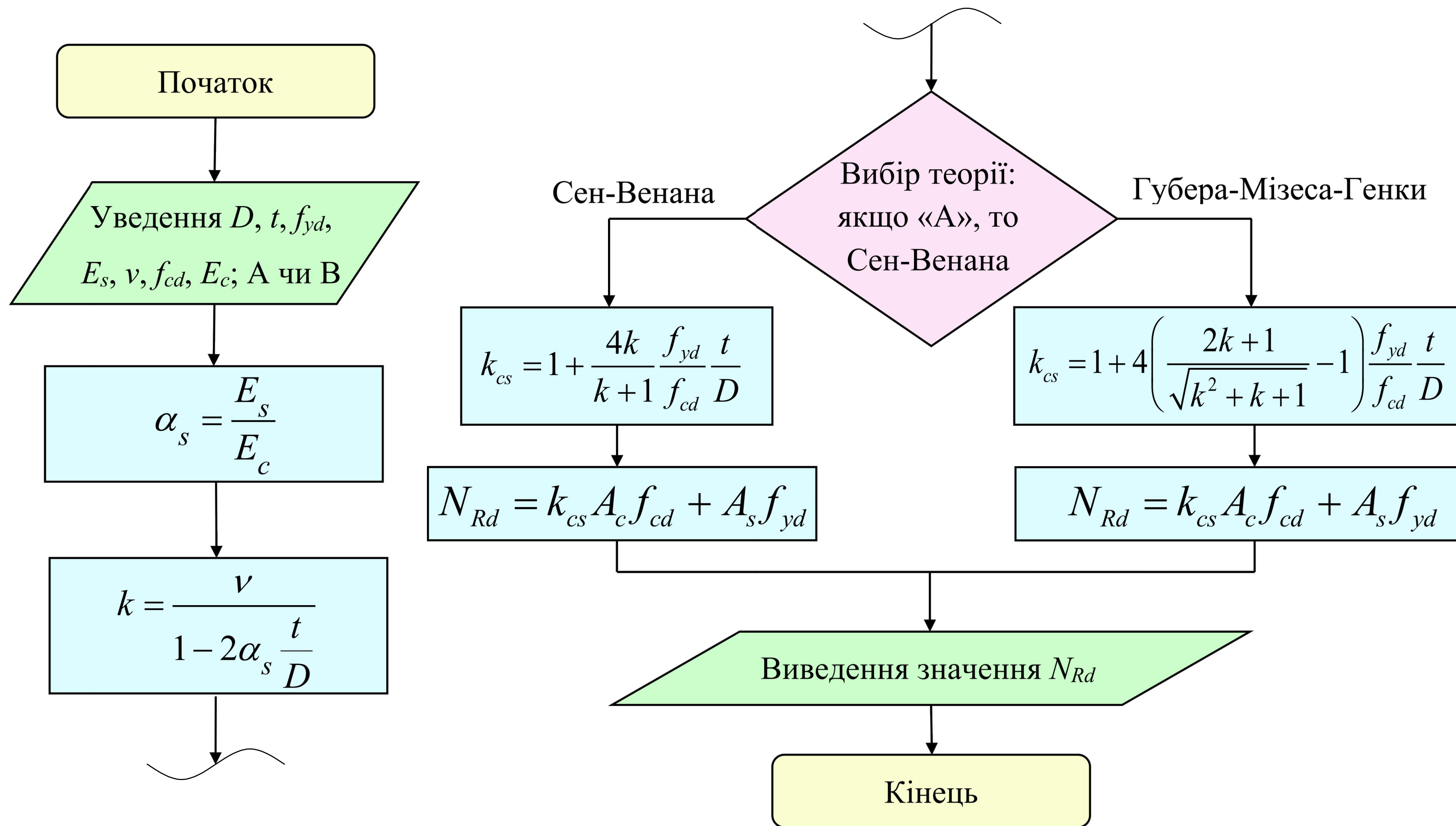
$$k_{cs} = 1 + 4 \left(\frac{2k+1}{\sqrt{k^2+k+1}} - 1 \right) \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \frac{t}{D}, \quad (22)$$

міцності трубобетонного елемента за теорією Губера-Мізеса-Генки:

$$N_{Rd} = \left(1 + 4 \left(\frac{2k+1}{\sqrt{k^2+k+1}} - 1 \right) \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \frac{t}{D} \right) A_c f_{cd} + A_s f_{yd}. \quad (23)$$

						2021	601-БП.20107.ДП				
						Міцність бетону в замкнутому просторі металевої труби при стисканні					
Зм	Кільк	Арх	Док	Підпис	Дата	Виведені розрахункові формули			Стадія	Аркуш	Аркушів
Виконав	Андрусів К.І.					ДП			7	15	
Перевірив	Таблюк А.М.					Формула розрахунку міцності із використанням коефіцієнта «зміцнення» бетону, формула коефіцієнта «зміцнення» бетону та міцності перерізу на основі різних теорій пластичності			Національний університет «Львівська політехніка» імені Юрія Кондратюка Кафедра БІАЦІ		
Н. Контр.	Семко О.В.										
Н. Контр.	Семко О.В.										

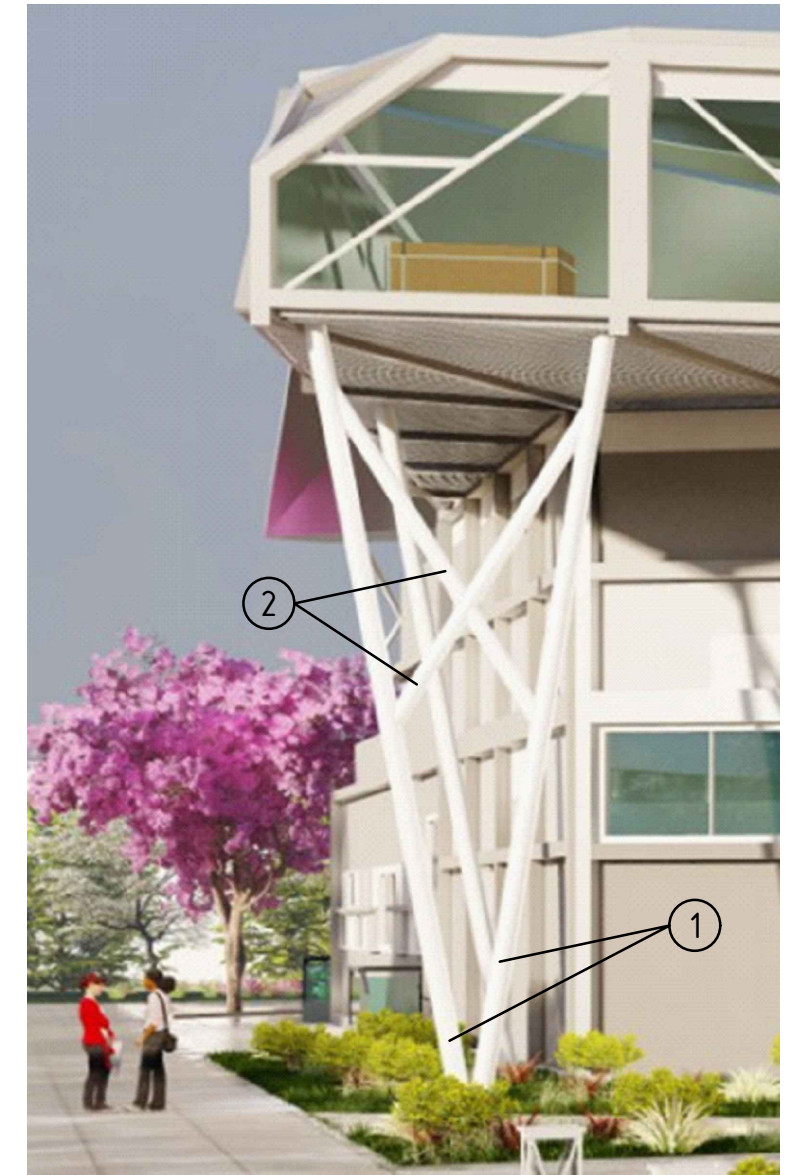
Блок-схема застосування методики розрахунку міцності трубобетонного елемента



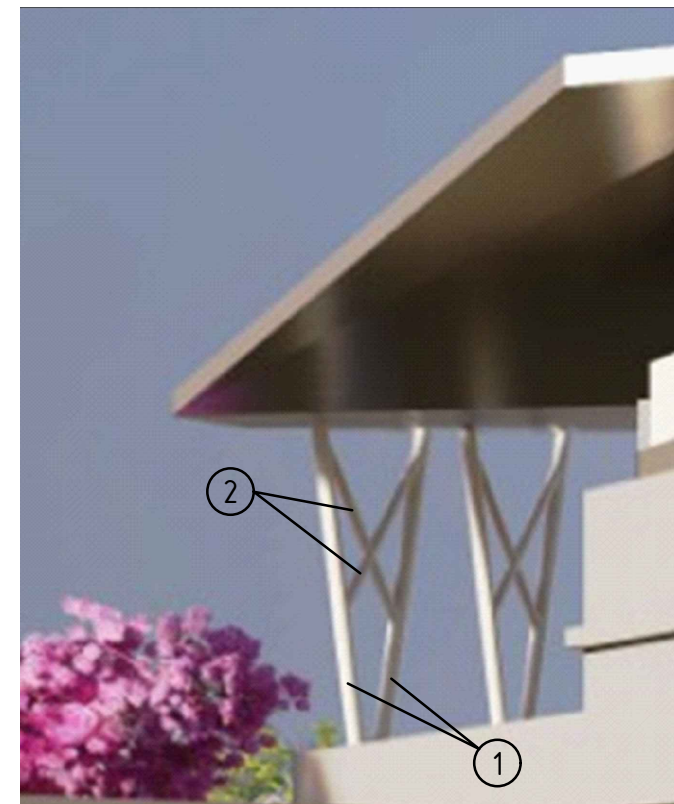
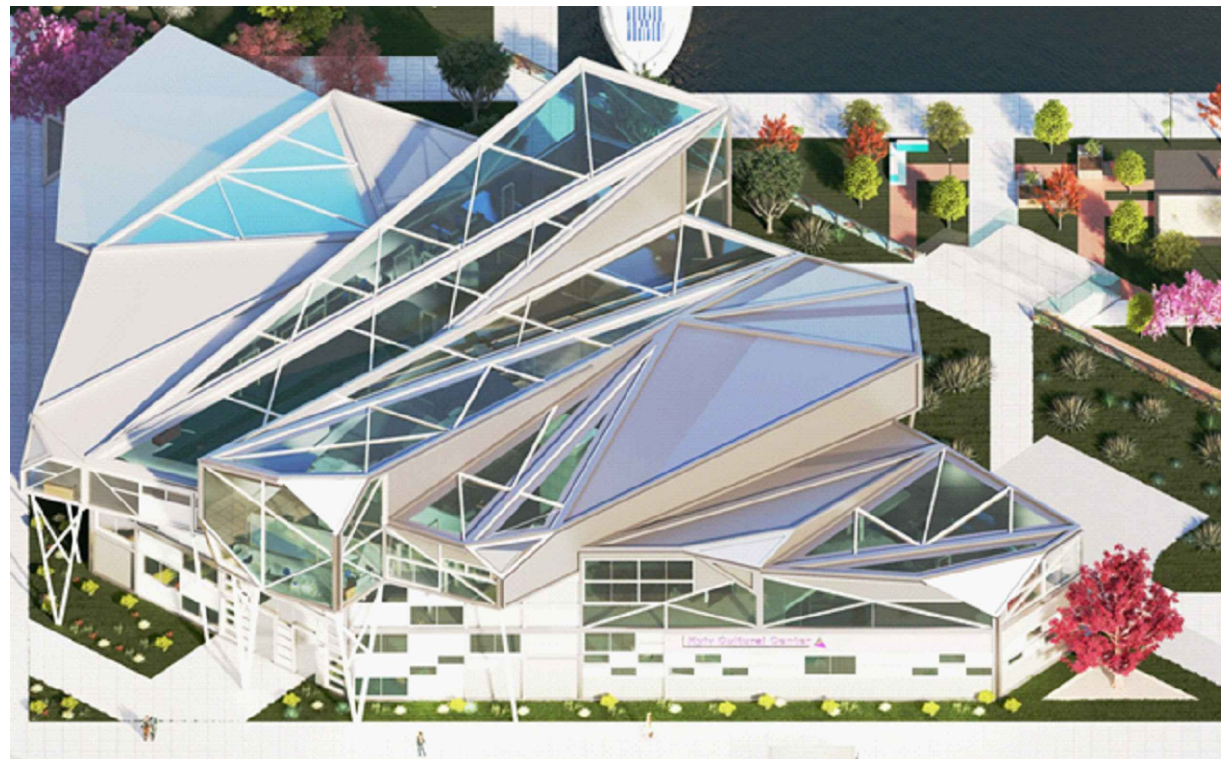
						2021	601-БП.20107.МР				
						Міцність бетону в замкнутому просторі металевої труби при стисканні					
Зм	Кільк	Арх	Док	Підпис	Дата	Блок-схема застосування методики розрахунку міцності			Старія	Архив	Архив
Виконала	Андрусів К.І.					Ч	8	15	Национальний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка" Кафедра БТМ		
Перевірив	Таблюков А.М.										
Н. Контр.	Семко О.В.										
Н. Контр.	Семко О.В.										

Приклад проектування будівлі з трубобетонними колонами, міцність яких розраховано за розробленою методикою

Головний фасад проекту С-955 культурного центру у м. Київ, STEEL FREEDOM 2021



Проект С-955 культурного центру у м. Київ (вигляд зверху), STEEL FREEDOM 2021



V-подібні опорні конструкції з трубобетону у проекті С-955 культурного центру:
1 - трубобетонні колони; 2 - сталеві в'язі

					2021	601-БП.20107.МР			
Зм	Київ	Арх	Док	Підпис	Дата	Міцність бетону в замкнутому просторі металевої труби при стисканні			
Виконала	Андрусів К.І.					Приклад проектування будівлі з трубобетонними колонами, міцність яких розраховано за розробленою методикою	Стадія	Аркуші	Аркушів
Перевірив	Таблаков А.М.					Методика	4	9	15
Головний фасад, вигляд зверху та V-подібні опорні конструкції з трубобетону проекту С-955 культурного центру у м. Київ, STEEL FREEDOM 2021						Национальний університет "Львівська політехніка" імені Юрія Кондратюка" Кафедра БТЦІІ			
Н. Контр.	Семко О.В.								
Н. Контр.	Семко О.В.								

Схема методики проведення натурних випробувань

Розміщуємо на нижній плиті преса зразок, верхня та нижня грані якого мають горизонтальні поверхні, виготовлені за допомогою розчину, та фіксуємо його положення верхньою плитою преса

Прикріплюємо до зразка вимірювальні прилади: індикатори годинникового типу та тензорезистори

Прикладаємо до зразка навантаження ступенями зі швидкістю $dF/d\varepsilon$ приблизно по 10% від очікуваного значення руйнівного навантаження

Фіксуємо значення необхідних величин: N_ε , N_y , ε_y

Аналізуємо отримані результати

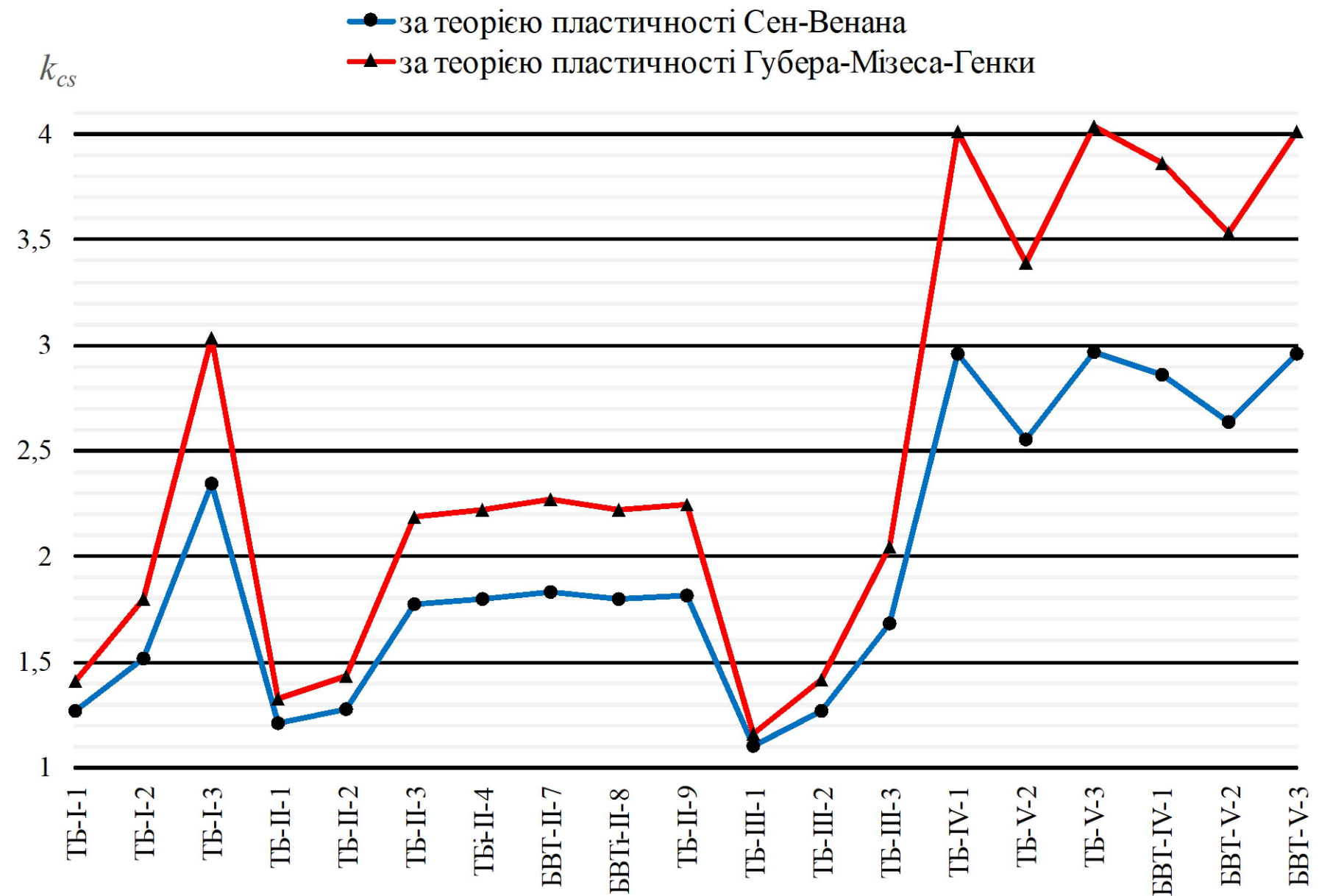
						2021			601-БП.20107.ДП
									Міцність бетону в замкнутому просторі металевої труби при стисканні
Зм	Кільк	Арж	Док	Підпис	Дата				Схема методики проведення натурних випробувань
Виконала	Андрусів К.І.							Старший	Архив
Перевірив	Табіков А.М.							ДП	10
									15
Н. Контр.	Семко О.В.								Национальний університет
Н. Контр.	Семко О.В.								"Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка" Кафедра БТЦІ

Порівняння значень коефіцієнта «зміцнення» бетону

Графіки значень коефіцієнта «зміцнення» бетону, розрахованих на основі теорії пластичності Сен-Венана та Губера-Мізеса-Генки

Значення коефіцієнта «зміцнення» бетону, розраховані на основі теорії пластичності Сен-Венана та Губера-Мізеса-Генки

№	Серія	k_{cs}^{CB}	$k_{cs}^{ГМГ}$	$\Delta k, \%$
1	ТБ-I-1	1,266	1,412	10,34
2	ТБ-I-2	1,52	1,801	15,60
3	ТБ-I-3	2,344	3,032	22,69
4	ТБ-II-1	1,211	1,325	8,60
5	ТБ-II-2	1,28	1,433	10,68
6	ТБ-II-3	1,778	2,191	18,85
7	ТБi-II-4	1,797	2,219	19,02
8	БВТ-II-7	1,833	2,274	19,39
9	БВТi-II-8	1,798	2,221	19,05
10	ТБ-II-9	1,814	2,245	19,20
11	ТБ-III-1	1,102	1,158	4,84
12	ТБ-III-2	1,269	1,415	10,32
13	ТБ-III-3	1,683	2,048	17,82
14	ТБ-IV-1	2,959	4,013	26,26
15	ТБ-V-2	2,552	3,394	24,81
16	ТБ-V-3	2,971	4,035	26,37
17	БВТ-IV-1	2,859	3,862	25,97
18	БВТ-V-2	2,64	3,529	25,19
19	БВТ-V-3	2,957	4,013	26,31



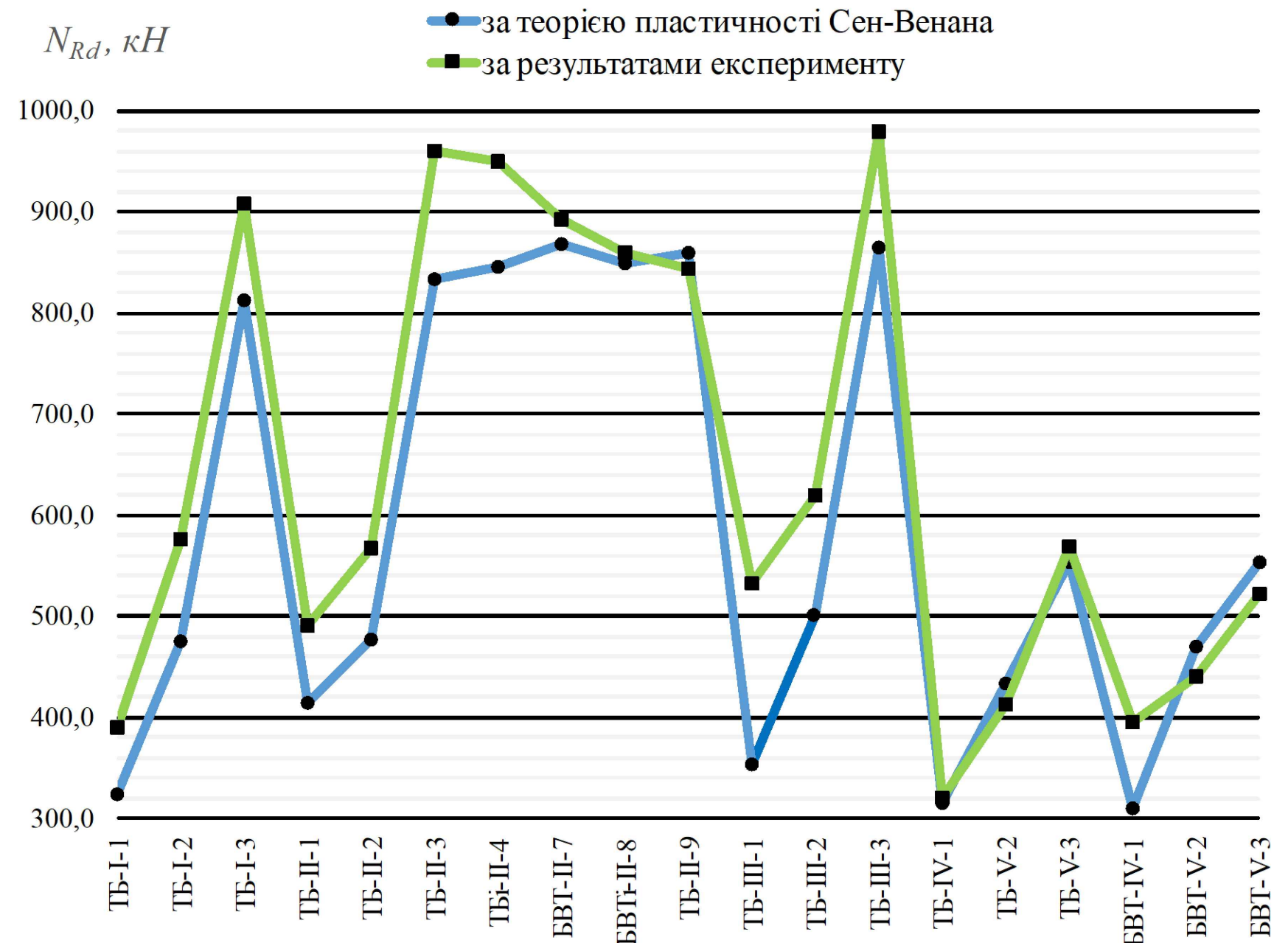
						2021	601-БП.20107.ДП				
						Міцність бетону в замкнутому просторі металевої труби при стиснанні					
Зм	Кільк	Арх	Док	Підпис	Дата	Порівняння значень коефіцієнта «зміцнення» бетону			Стадія	Архив	Архив
Виконав	Андрусів К.І.					«зміцнення» бетону			ДП	11	15
Перевірив	Таблюк А.М.					Таблиця та графіки розрахованих значень коефіцієнта «зміцнення» бетону			Національний університет «Львівська політехніка» імені Юрія Кондратюка Кафедра БТДІ		
Н. Контр.	Семко О.В.										
Н. Контр.	Семко О.В.										

Порівняння експериментальних* значень міцності трубобетонних елементів із теоретичними, розрахованими на основі теорії пластичності Сен-Венана

Графіки значень міцності трубобетонних зразків за результатами експерименту* та на основі теорії Сен-Венана

Значення міцності трубобетонних зразків: експериментальні* та за теорією пластичності Сен-Венана

№	Серія	N_y , кН	N_{Rd}^{CB} , кН	$\Delta_{N_{св}}$, %
1	ТБ-I-1	390,7	324,0	17,08
2	ТБ-I-2	576,3	476,0	17,41
3	ТБ-I-3	908,3	812,7	10,53
4	ТБ-II-1	491,7	415,4	15,52
5	ТБ-II-2	566,7	477,8	15,68
6	ТБ-II-3	960	834,0	13,12
7	ТБi-II-4	950	845,2	11,03
8	БВТ-II-7	893,3	868,2	2,81
9	БВТi-II-8	860	849,7	1,20
10	ТБ-II-9	843,3	859,7	-1,95
11	ТБ-III-1	533,3	353,2	33,77
12	ТБ-III-2	620	500,6	19,25
13	ТБ-III-3	980	864,7	11,76
14	ТБ-IV-1	320,3	315,2	1,60
15	ТБ-V-2	412,5	433,5	-5,09
16	ТБ-V-3	569,4	554,4	2,64
17	БВТ-IV-1	395,1	309,6	21,64
18	БВТ-V-2	441,3	470,0	-6,50
19	БВТ-V-3	522,2	554,5	-6,18



*Дані експериментів наведено за монографією «Високоєфективні технології та комплексні конструкції в будівництві» [43].

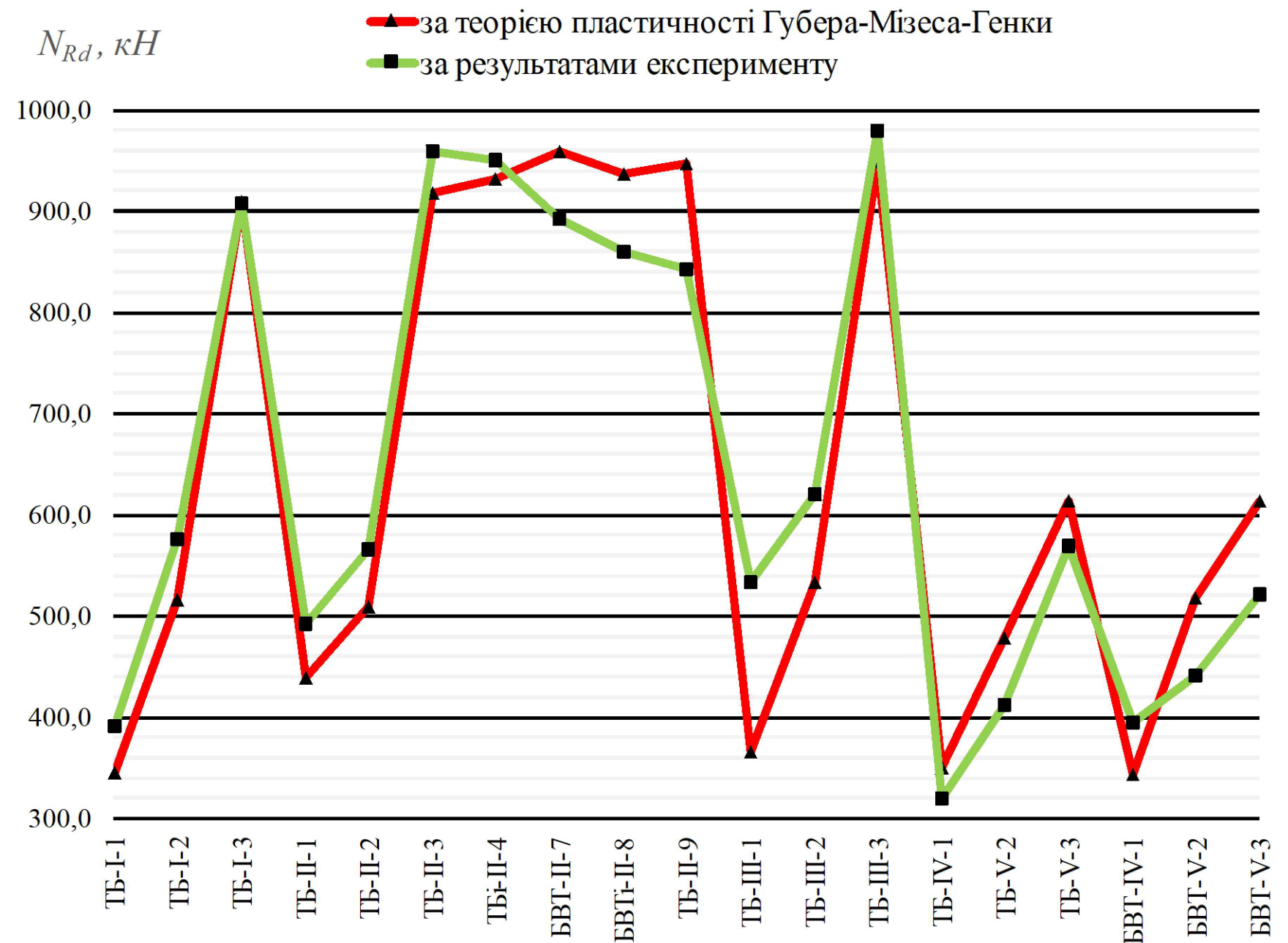
						2021	601-БП.20107.ДП				
						Міцність бетону в замкнутому просторі металевої труби при стисканні					
Зм	Кільк	Арх	Док	Підпис	Дата	Порівняння експериментальних значень міцності із теоретичними, розрахованими на основі теорії пластичності Сен-Венана			Стадія	Архив	Архив
Виконав	Андрусів К.І.					Таблиця та графік порівняння експериментальних значень міцності із теоретичними, розрахованими за теорією пластичності Сен-Венана			ДП	12	15
Перевірив	Таблаков А.М.					Н. Коштр. Семко О.В.			Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка" Кафедра БТДЦ		
Н. Коштр.	Семко О.В.					Н. Коштр. Семко О.В.					

Порівняння експериментальних* значень міцності трубобетонних елементів із теоретичними, розрахованими на основі теорії пластичності Губера-Мізеса-Генки

Значення міцності зразків: експериментальні* та за теорією пластичності Губера-Мізеса-Генки

№	Серія	N_y , кН	N_{Rd}^{GMG} , кН	$\Delta_{N_{GMG}}$, %
1	ТБ-I-1	390,7	344,6	11,81
2	ТБ-I-2	576,3	515,6	10,53
3	ТБ-I-3	908,3	909,7	-0,15
4	ТБ-II-1	491,7	438,8	10,76
5	ТБ-II-2	566,7	509,2	10,15
6	ТБ-II-3	960	918,7	4,31
7	ТБi-II-4	950	931,6	1,93
8	БВТ-II-7	893,3	958,4	-7,29
9	БВТi-II-8	860	936,6	-8,91
10	ТБ-II-9	843,3	947,9	-12,40
11	ТБ-III-1	533,3	366,0	31,36
12	ТБ-III-2	620	534,2	13,84
13	ТБ-III-3	980	948,7	3,19
14	ТБ-IV-1	320,3	351,2	-9,63
15	ТБ-V-2	412,5	479,4	-16,22
16	ТБ-V-3	569,4	613,9	-7,81
17	БВТ-IV-1	395,1	343,9	12,97
18	БВТ-V-2	441,3	518,5	-17,49
19	БВТ-V-3	522,2	614,3	-17,63

Графіки значень міцності трубобетонних зразків за результатами експерименту* та на основі теорії Губера-Мізеса-Генки

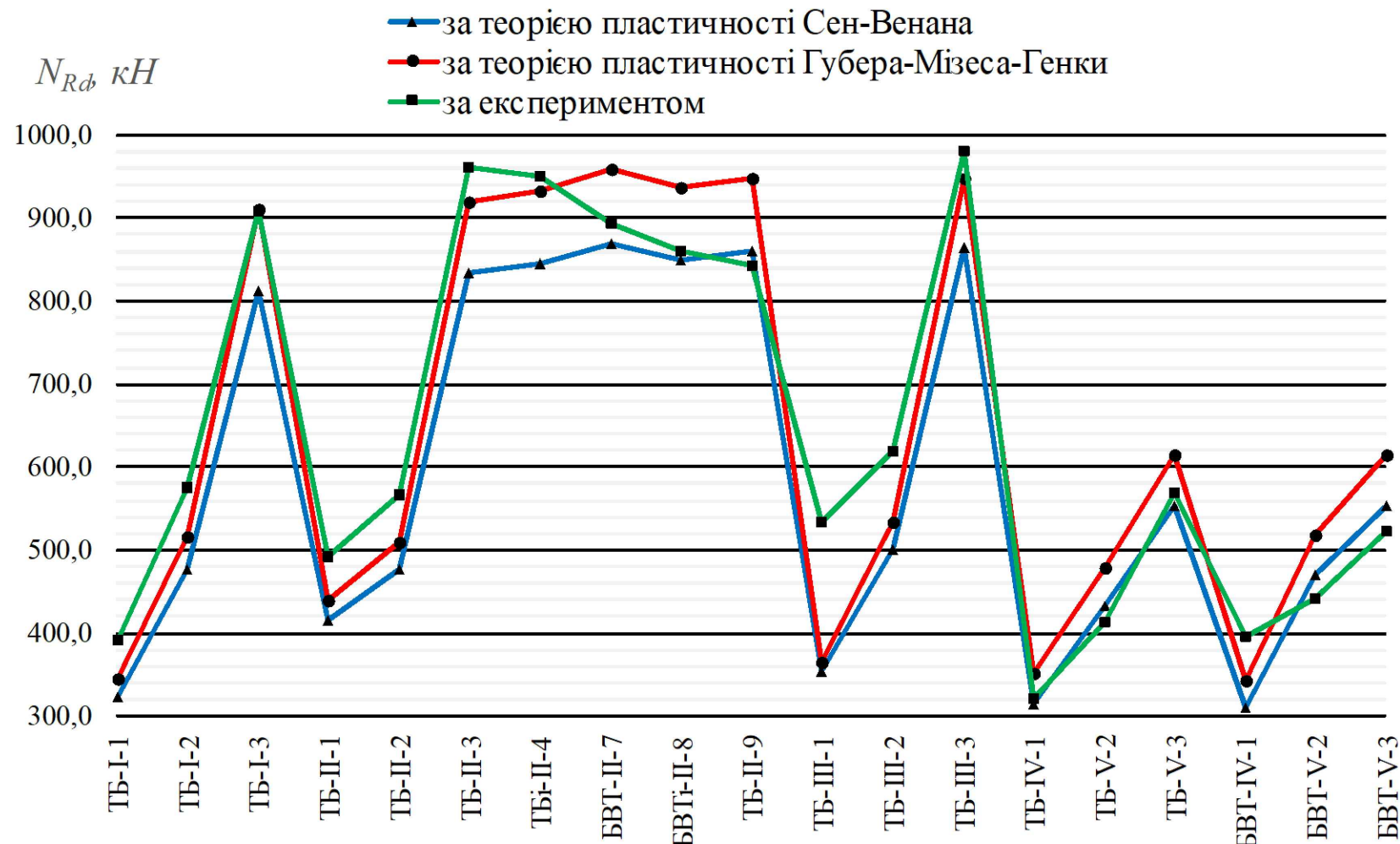


*Дані експериментів наведено за монографією «Високоефективні технології та комплексні конструкції в будівництві» [43].

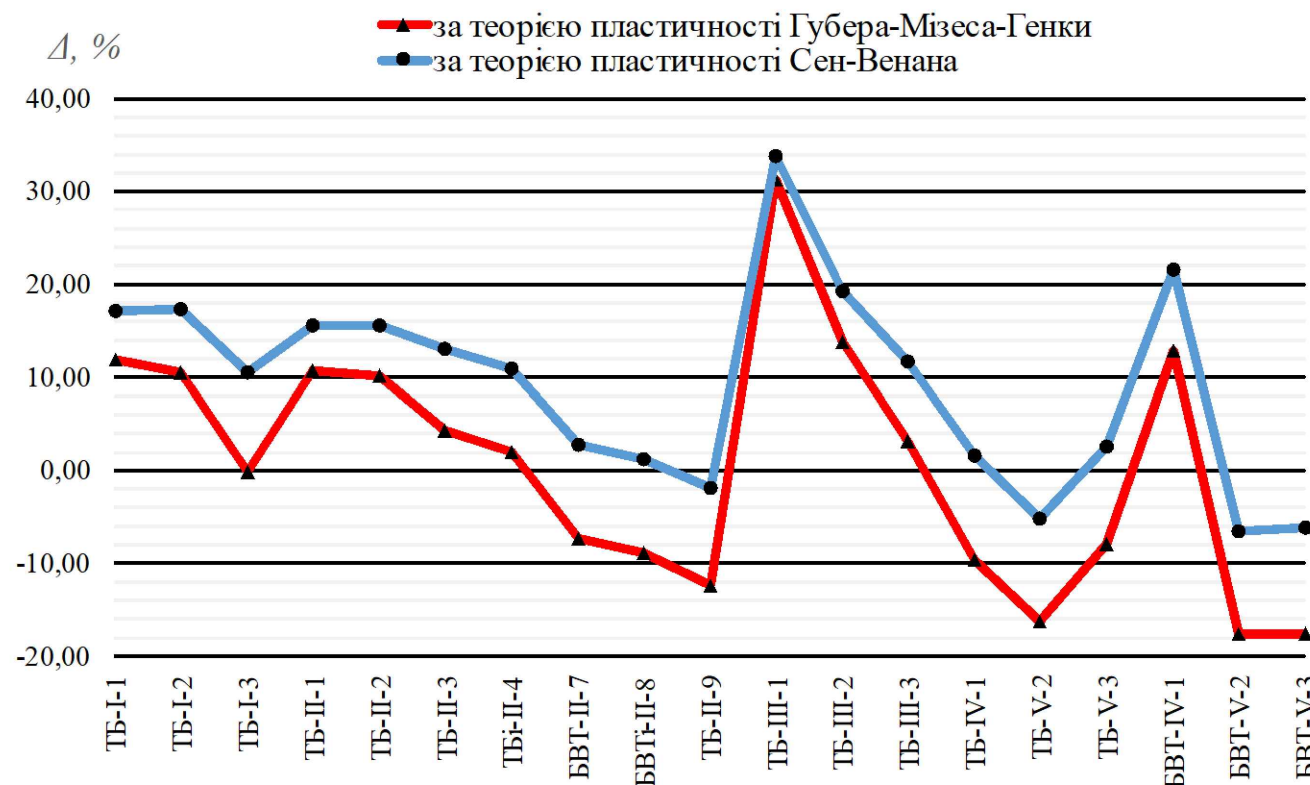
						2021	601-БП.20107.ДП				
						Міцність бетону в замкнутому просторі металевої труби при стисканні					
Зм	Кільк	Арх	Док	Підпис	Дата	Порівняння експериментальних значень міцності із теоретичними, розрахованими на основі теорії пластичності Губера-Мізеса-Генки			Стадія	Архив	Архив
Виконала	Андрусів К.І.					Таблиця та графіки порівняння експериментальних значень міцності із теоретичними, розрахованими за теорією пластичності Губера-Мізеса-Генки			ДП	13	15
Перевірив	Габлюк А.М.					Национальний університет «Львівська політехніка» імені Юрія Кондратюка			Кафедра БТДІ		
Н. Контр.	Семко О.В.										
Н. Контр.	Семко О.В.										

Порівняння точності отриманих розрахункових значень міцності трубобетонних елементів за двома розглянутими теоріями пластичності

Графіки значень міцності трубобетонних зразків



Графіки значень відносних похибок розрахунків



Порівняння точності розрахунків за умовами теорії пластичності Сен-Венана та Губера-Мізеса-Генки

№	Серія	$\Delta_{N_{св}}, \%$	$\Delta_{N_{гмг}}, \%$	Вища точність теорії Сен-Венана
1	ТБ-I-1	17,08	11,81	-
2	ТБ-I-2	17,41	10,53	-
3	ТБ-I-3	10,53	-0,15	-
4	ТБ-II-1	15,52	10,76	-
5	ТБ-II-2	15,68	10,15	-
6	ТБ-II-3	13,12	4,31	-
7	ТБi-II-4	11,03	1,93	-
8	БВТ-II-7	2,81	-7,29	+
9	БВТi-II-8	1,20	-8,91	+
10	ТБ-II-9	-1,95	-12,40	+
11	ТБ-III-1	33,77	31,36	-
12	ТБ-III-2	19,25	13,84	-
13	ТБ-III-3	11,76	3,19	-
14	ТБ-IV-1	1,60	-9,63	+
15	ТБ-V-2	-5,09	-16,22	+
16	ТБ-V-3	2,64	-7,81	+
17	БВТ-IV-1	21,64	12,97	-
18	БВТ-V-2	-6,50	-17,49	+
19	БВТ-V-3	-6,18	-17,63	+
Середнє відхилення		11,30	10,97	-

Висновки за магістерською роботою

1. Виконано огляд літератури, систематизовано дані щодо галузей застосування сталезалізобетонних конструкцій, нормативних положень їхнього проектування, наукових досліджень та теорій, котрі були застосовані в дослідженнях різних авторів, а також виявлено недоліки існуючих теорій розрахунку міцності трубобетонних елементів.
2. Обрано розрахункову схему та передумови, за якими вперше отримано формули несучої здатності трубобетонних конструкцій для стану, при якому бетон та сталь руйнуються одночасно.
3. Для виведення формул міцності трубобетонних елементів на деформаційній основі використано умови теорії пластичності Сен-Венана та Губера-Мізеса-Генки.
4. Додатково виведено формули для обчислення значень коефіцієнта «зміцнення» бетону за обома використаними теоріями пластичності.
5. З метою застосування на практиці виведених формул розроблено методичку розрахунку несучої здатності трубобетонних конструкцій у вигляді блок-схеми реалізації на ПЕОМ.
6. Виконано розрахунок за розробленою методикою для перевірки можливості її застосування та складності використання.
7. Порівняння результатів теоретичного розрахунку з експериментальними даними показало, що виведені формули можуть бути застосовані для виконання розрахунків на практиці.

					2021		601-БП.20107.ДП			
							Міцність бетону в замкнутому просторі металевої труби при стисканні			
Зм	Кільк	Арж	Док	Підпис	Дата		Висновки за магістерською роботою	Стадія	Аркуш	АркушВ
Виконала	Андрусів К.І.							ДП	15	15
Перевірив	Таблаков А.М.									
Н. Контр.	Семко О.В.									
Н. Контр.	Семко О.В.									