

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛТАВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА

СІРОБАБА ВІТАЛІЙ ОЛЕКСІЙОВИЧ



УДК 624.046:624.016-022.12

**НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ ТА ДЕФОРМАТИВНІСТЬ  
СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ З ЛЕГКИХ БЕТОНІВ**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

АВТОРЕФЕРАТ  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Полтава – 2018

Дисертація є рукописом.

Роботу виконано в Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Семко Олександр Володимирович,**  
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри архітектури та міського будівництва.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, доцент  
**Ватуля Гліб Леонідович,**  
Український державний університет залізничного транспорту (м. Харків) Міністерства освіти і науки України, проректор з наукової роботи;

кандидат технічних наук  
**Срібняк Наталія Миколаївна,**  
Сумський національний аграрний університет, Міністерства освіти і науки України, доцент кафедри будівельних конструкцій

Захист відбудеться «\_\_\_\_\_» грудня 2018р., о \_\_\_\_ год., на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 44.052.02 при Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка за адресою: 36011, м. Полтава, Першотравневий проспект, 24, ауд.218.

З дисертацією можна ознайомитись в науковій бібліотеці Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка за адресою: 36011, м. Полтава, Першотравневий проспект, 24.

Автореферат розіслано «\_\_\_\_» листопада 2018р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Т.А. Галінська

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У світовій будівельній практиці одним із найефективніших матеріалів є сталезалізобетон (СЗБ), який використовують для проектування несучих конструкцій, але при їх застосовуванні виникла необхідність врахування теплопровідності та міцності які поліпшують традиційні характеристики конструкцій. Ці фактори обумовили виникнення комплексних СЗБ конструкцій підвищеної легкості при відповідній міцності.

Для вирішення даних задач запропоновано підсилення тонкостінних холодноформованих металевих профілів легкими бетонами. Розрахунок міцності та деформативності СЗБ конструкцій, як і будь-яких інших, виконується за загальними методами розрахунку будівельних конструкцій. Однак, враховуючи особливості розрахунку легких холодноформованих сталевих тонкостінних конструкцій та їх сумісну роботу з легким бетоном, це питання потребує детального вивчення. Таким чином, актуальною науково-технічною задачею є розробка методів визначення напружено-деформованого стану та визначення дійсної роботи легких СЗБ конструкцій з легких бетонів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема дисертаційної роботи відповідає напрямку вивчення напружено-деформованого стану СЗБ конструкцій на кафедрі архітектури та міського будівництва Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Результати були реалізовані у межах держбюджетних прикладних науково-дослідницьких робіт за темами: «Ресурсоекономні технології відновлення й реконструкції житлових, громадських і виробничих будівель та захисних споруд цивільної оборони» №97/16 (державний реєстраційний номер 0116U002567). «Комплексні конструктивні рішення забезпечення енергоефективності громадських будівель в умовах євроінтеграції» № 102/18 (державний реєстраційний номер 0118U001097).

**Мета роботи:** визначити несучу здатність та деформативність сталезалізобетонних конструкцій з легких бетонів.

Визначеній меті відповідають такі основні **задачі дослідження:**

1. Розвинуто методику експериментальних досліджень несучої здатності та деформативності сталезалізобетонних конструкцій з легких бетонів та холодноформованих сталевих профілів.

2. Дослідити напружено-деформативний стан сталезалізобетонних конструкцій з використанням різних холодноформованих профілів та їх з'єднань.

3. Визначити раціональний склад легкого бетону як складова несучого елемента та утеплювача для стінових конструкцій.

4. Провести комп'ютерне моделювання несучої здатності та деформативності з легких сталевих тонкостінних конструкцій на легкому бетоні методом скінченних елементів.

5. Провести порівняльний статистичний аналіз отриманих результатів експериментів і комп'ютерного моделювання.

6. Надати рекомендації щодо інженерних методів розрахунку на міцність та деформативність сталезалізобетонних конструкцій з легких бетонів.

**Об'єкт дослідження** – стиск сталезалізобетонних конструкцій з легких бетонів.

**Предмет дослідження** – несуча здатність та деформативність сталезалізобетонних конструкцій з легких бетонів.

**Методи дослідження:** експериментальні методи дослідження міцності та деформування сталезалізобетонних стійок, чисельні методи розрахунку напружено-деформованого стану методом скінчених елементів.

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

- дістали подальшого розвитку нові конструктивні рішення сталезалізобетонних стійок із використанням легких сталевих тонкостінних конструкцій та легкого полістиролбетону;

- отримано нові дані експериментальних досліджень несучої здатності та деформативності сталезалізобетонних зразків з легких бетонів;

- розвинуто методику чисельного моделювання несучої здатності та деформативності СЗБ конструкцій з легких бетонів та тонкостінних профілів;

- вперше запропоновано систему коефіцієнтів для розрахунку стійкості сталезалізобетонних стійок із використанням легких сталевих тонкостінних конструкцій та легкого бетону;

- розвинуто інженерні методи розрахунку сталезалізобетонних конструкцій з легкими бетонами.

**Практичне значення одержаних результатів роботи:**

- розроблено методику виготовлення СЗБ конструкцій з легких бетонів із уточненням ефективного розміщення профілю у перерізі сталезалізобетонних конструкцій;

- розроблені нові типи СЗБ конструкцій, які можуть застосовуватись у каркасних промислових та цивільних будівель;

- результати дослідження несучої здатності та деформативності використані для проектування каркасів цивільних будівель зі СЗБ конструкцій, що дозволило підвищити ефективність використання даних конструкцій.

**Особистий внесок автора.** Результати, подані в дисертації, отримані самостійно та у співавторстві. У співавторстві наукових публікацій здобувачеві належить: огляд літератури, аналіз ефективності використання різного виду сталевих профілів, участь у проведенні чисельного моделювання сталевих каркасів на основі легких сталевих тонкостінних профілів, формулювання висновків [1]; участь у проведенні експериментальних досліджень, дослідження сталевих рам у програмному комплексі, формулювання висновків [2]; підбір та аналіз легких бетонів для підвищення несучої здатності ЛСТК, формулювання висновків [3]; порівняння методів розрахунку сталезалізобетонних колон на позакентровий стиск із визначенням особливостей, формулювання висновків [4]; виготовлення та проведення експериментальних досліджень з'єднань тонкостінних оцинкованих

конструкцій, аналіз отриманих експериментальних даних, формулювання висновків [5]; дослідження оптимальних параметрів сталезалізобетонних конструкцій з легких бетонів, формулювання висновків [6]; підготовка експериментальних зразків та експериментальної установки, участь у проведенні експериментальних досліджень сталезалізобетонних конструкцій із ЛСТК та полістиролбетону, аналіз отриманих даних та формулювання висновків [7]; участь у підготовці зразків та проведення експериментальних досліджень, визначення особливостей роботи сталезалізобетонних конструкцій, формулювання висновків [8].

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи викладено в доповідях на таких конференціях: 66-та наукова конференція професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка, м. Полтава, 2014р; восьма науково-технічна конференція «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди» м. Рівне 2014р; науково-практична конференція викладачів, аспірантів та студентів СНАУ м. Суми, 2015р; IX Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми й перспективи розвитку академічної та університетської науки». м. Полтава, 2016р; I Міжнародна азербайджансько-українська конференція «BUILDING INNOVATIONS – 2018», Баку, Азербайджан, 2018 р.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 8 наукових праць, з них 6 у фахових виданнях рекомендованих Міністерством освіти і науки України, в тому числі 4 у виданнях, що включено до міжнародних наукометричних баз. Крім того, 1 наукова праця опублікована за кордоном.

**Обсяг та структура роботи.** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків і додатків. Роботу виконано на 175 сторінках, машинописного тексту, з яких 142 сторінки основного тексту, 43 повних сторінок з рисунками та таблицями, 21 сторінка списку використаних джерел.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету й завдання дослідження, висвітлено наукову новизну та практичну цінність роботи, подано її загальну характеристику.

У **першому розділі** наведено результати огляду наукової літератури, пов'язаної з сталезалізобетонними конструкціями. Враховуючи, що відповідні дослідження проводяться вперше, розрахунок легких сталезалізобетонних конструкцій визначався на основі відомих теоретичних методів вивчення роботи трубобетону.

Спільною роботою полістиролбетону з залізобетонними панелями займалися такі вчені: М.В. Савицький, В.І. Большаков, О.І. Довженко, А.М. Сопільняк та інші. Взаємна робота елементів каркасів будівель із настилами покрівель та обшивкою

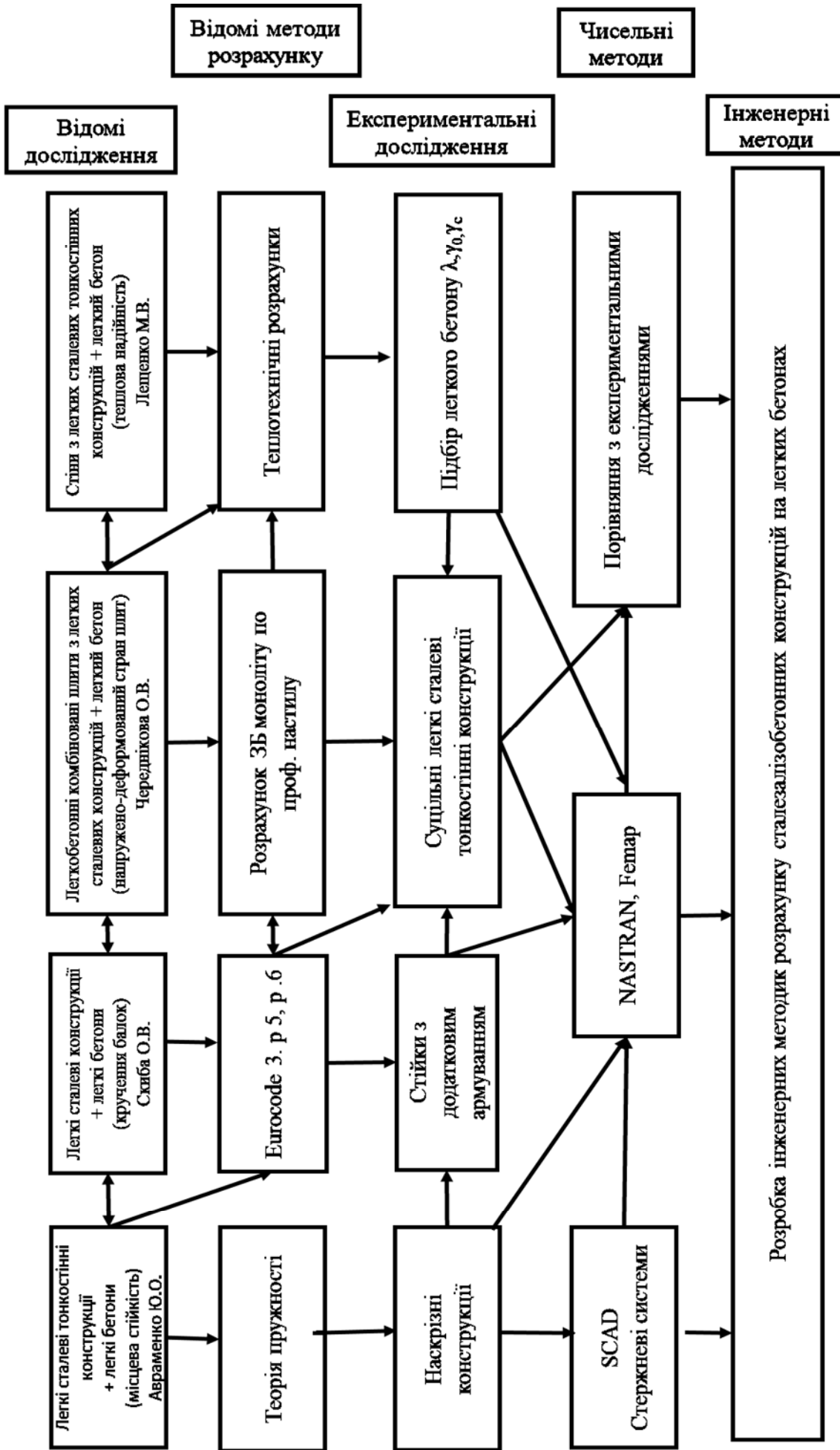


Рисунок 1. Структурно-логічна схема дисертаційної роботи

стін досліджувалась М.В. Савицьким, О.Г. Зінкевич, L. Fiorino, O. Iuorio, R. Landolfo.

Характеру роботи сталезалізобетонних конструкцій замкнутого прямокутного перерізу з важких бетонів вивчали у своїх роботах Е.Д. Чихладзе, Г.Л. Ватуля.

Вчені Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка під керівництвом Л.І. Стороженка, який є засновником школи сталезалізобетону з 1986 року проводять практичні та теоретичні дослідження. Відомі праці С.Ф. Пічугіна, О.В. Семка, Г.В. Головка, В.І. Маракуци, В.М. Сурдіна, В.І. Барбарського, В.В. Васюти, С.В. Шкіренка, Д.А. Єрмоленка, О.І. Лапенка, В.Ф. Пенца, О.П. Воскобійник, В.О. Семка, А.В. Гасенка, Ю.О. Авраменка, І.О. Пархоменко, К.О. Шумейко, О.В. Демченко, О.В. Скиби, М.В. Лещенко, П.О. Семка, О.В. Череднікової та інші.

Виконаний аналіз наукової літератури дає змогу зробити висновок, що на сьогодні потрібні додаткові дослідження несучої здатності та деформативності сталезалізобетонних конструкцій з легких бетонів.

У **другому розділі** на основі проведених теоретичних досліджень були визначені основна мета й завдання дисертаційної роботи. Послідовність досліджень показана на структурно-логічній схемі дисертаційної роботи (рисунок 1).

Всі зразки поділені на п'ять серій. Кожна з серій призначена охарактеризувати роботу як окремих складових, так і всієї конструкції зразка.

Перша серія зразків обумовлена підбором та перевіркою фізико-механічних характеристик обраного класу полістиролбетону.

Для визначення оптимального класу за середньою густиною побудовано криві залежності середньої густини, середньої міцності відповідного класу та максимальної теплопровідності полістиролбетону (рис. 2)

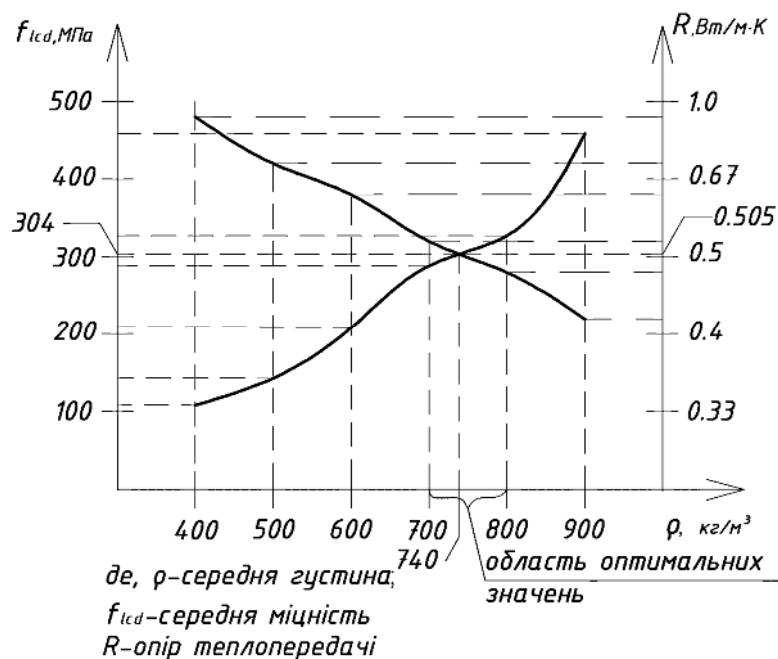


Рисунок 2. Зведений графік характеристик полістиролбетону в залежності від міцності, щільності та теплопровідності

На перетині двох кривих показано оптимальні значення характеристик полістиролбетону: середня густина полістиролбетону –  $740 \text{ кг/м}^3$ , середня міцність  $f_{\text{lcd}} = 30.4 \text{ кгс/см}^2$  і коефіцієнт теплопровідності  $R = 0.505 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ .

Одним з головних питань дослідження було визначення модуля пружності полістиролбетону відповідного класу та його фактичної міцності.



Рисунок 3. Кубики полістиролбетону 100x100x100мм



Рисунок 4. Циліндри полістиролбетону 400x100мм



Рисунок 5. Визначення теплопровідності полістиролбетону

Був проведений аналіз по підбору оптимальної густини полістиролбетону для стінової легкої сталезалізобетонної конструкції з визначенням її фізико-механічних властивостей. Усім поставленим вимогам відповідає полістиролбетон із середньою густиною D750. Загальний модуль пружності полістиролбетону визначається як середнє арифметичне на рівні 30% від руйнуючого навантаження, що становить за розрахунками 402,43 МПа.

У другій серії зразків проведено випробування металевих циліндрів. Експериментальним шляхом визначено фізико-механічні властивості зовнішньої сталеві оболонки, модуль пружності сталі  $E = 2.1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ . Міцність та деформативність сталеві оболонки визначалась при довжині 400мм та довжиною 1500мм зразках (рисунок 6-7).

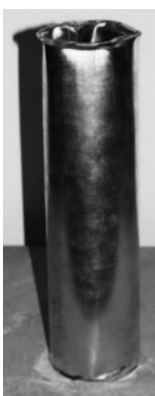


Рисунок 6. Характер руйнування сталеві труби ЦМ40



Рисунок 7. Характер руйнування сталеві труби ЦМ150

Особливістю оболонки, виготовленої із тонкостінної оцинкованої сталі, є утворення циліндричної форми із відповідними з'єднаннями.

Визначення міцності з'єднання проводилося на зразках 250x40x0,42мм.



Використання запропонованих видів з'єднання обмежене технологією монтажу у трубних елементах. Особливості роботи кожного із з'єднань можна спостерігати на рисунках 8-13.

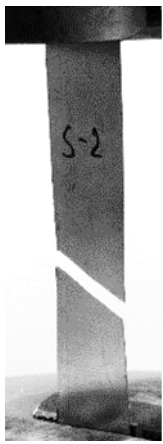


Рисунок 8.  
Випробування  
сталевої  
пластини

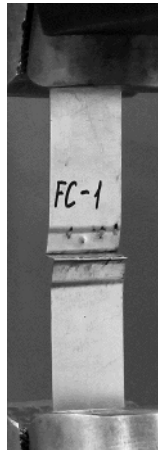


Рисунок 9.  
З'єднання  
фальцеве  
одиночне



Рисунок 10.  
З'єднання  
фальцеве  
подвійне

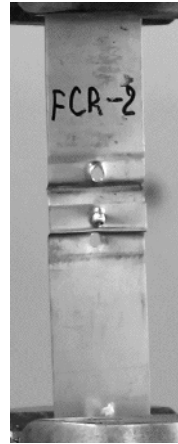


Рисунок 11.  
З'єднання  
фальцеве +  
заклепкове



Рисунок 12.  
З'єднання  
фальцеве +  
заклепкове  
подвійне



Рисунок 13.  
З'єднання  
фальцеве +  
напівавтоматичне  
зварювання

Характеризуючи роботу підсилених з'єднань можна виділити основні моменти:

1. Одиночне та подвійне фальцеве з'єднання не є конструктивним робочим з'єднанням, кількість фальців підвищує міцність з'єднань, що працюють на розтяг, але значення підвищення досить незначні.

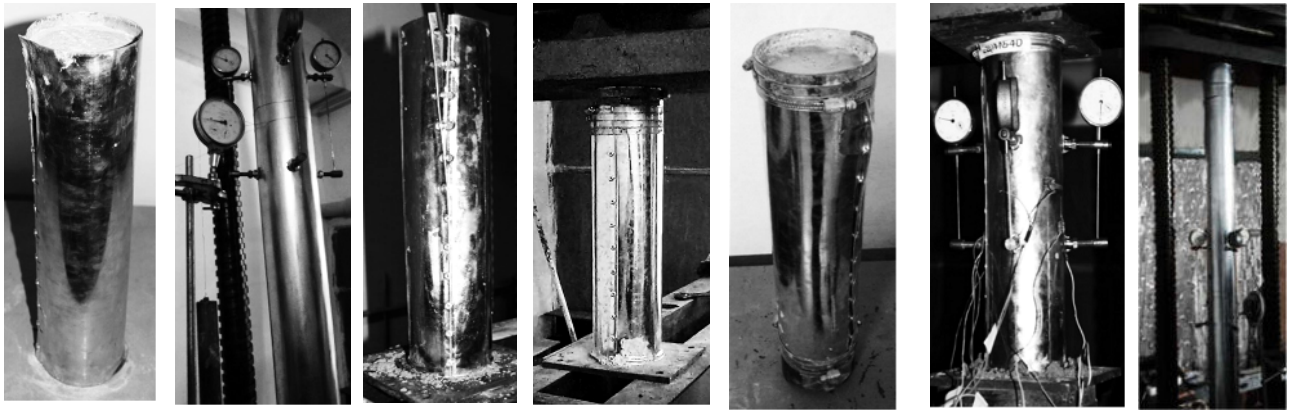
2. Зварні з'єднання показали значно кращий результат міцності на розтяг, але виходячи із умов подальшого захисту цих з'єднань від корозії (так як при зварювання навколо шва вигорає шар цинкування), складності при виготовленні (велика вірогідність пропалу, що значно понижує міцність), концентрації напружень біля зварного шва, наявності надлишкових деформації тонкостінного металу, даний вид з'єднання не є економічно вигідним.

3. Заклепкові з'єднання – найбільш доцільні при виготовленні даного типу конструкцій. Руйнування з'єднання відбулося внаслідок зрізу заклепок тому при збільшенні кількості або міцності заклепок, можна досягти вищих характеристик міцності даного виду з'єднань.

Випробування третьої серії зразків – двокомпонентних трубобетонних конструкцій. Для поліпшення отриманих результатів пропонується підвищити несучу здатність трубної конструкції шляхом бетонування легким полістиролбетоном, утворивши новий вид конструкції.

Навантаження на зразки передавалися двома способами: на бетонне ядро та на весь переріз.

Характер руйнування сталезалізобетонних конструкцій на легких бетонах показано на рисунку 14.



ЦМБ406 ЦМБ1506 ЦМП40 ЦМБХ40 ЦМБ2Х40 ЦМБ40 ЦМБ150

Рисунок 14. Характер руйнування двокомпонентних сталезалізобетонних конструкцій з легких бетонів

Наступна, четверта серія зразків, моделює роботу трикомпонентної конструкції, яка складається із сталевого оцинкованого «С» профілю, бетонного заповнювача із полістиролбетону та сталеві оболонки, що виконує подвійну функцію: незнімної опалубки і робочого елемента.

Профіль 50х30мм товщиною 0.3мм підбирався у два рази менший за діаметр сталеві труби з урахуванням повного бетонування профілю у трубному перерізі та розміщувався з врахуванням таких вимог: вісь, що проходить через центр ваги профілю, труби і бетону, повинна співпадати з осьовим центром всього перерізу; бетон повинен заповнювати рівномірно весь внутрішній простір трубного елемента та весь переріз профілю; стінка профілю повинна розміщуватися на протилежній стороні від з'єднання сталеві оболонки.

Характер руйнування трикомпонентних сталезалізобетонних конструкцій на легких бетонах показано на рисунку 15.



ЦМБП406

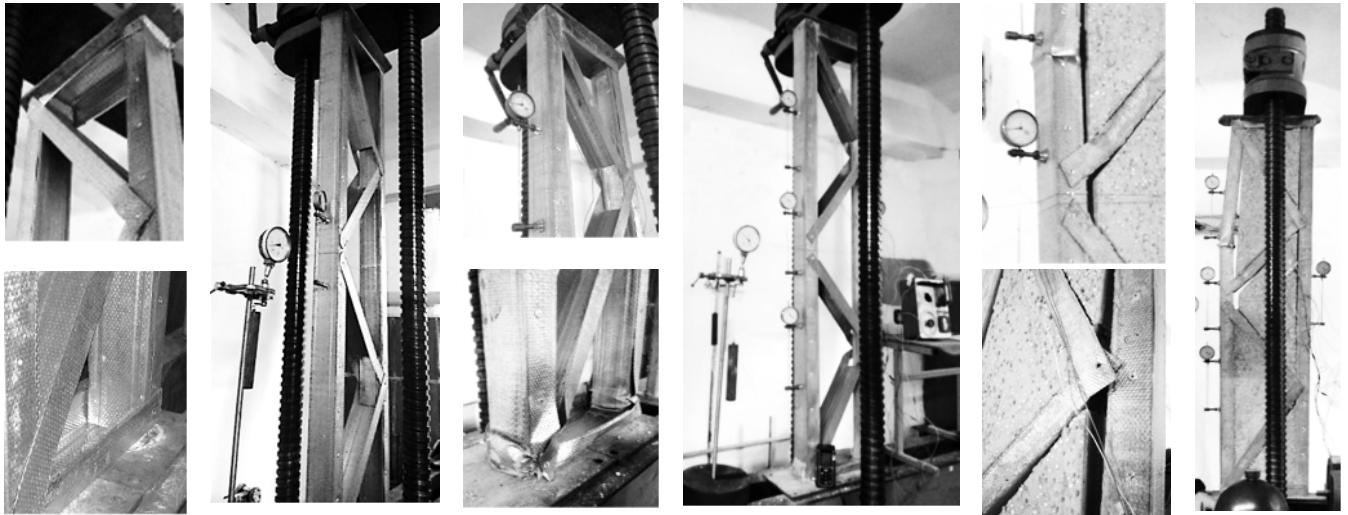
ЦМБП40

ЦМБП1506

ЦМБП150

Рисунок 15. Характер руйнування трикомпонентних сталезалізобетонних конструкцій з легких бетонів

П'ята серія зразків виготовлена з врахуванням всіх позитивних і негативних особливостей кожного з використаних матеріалів на основі тонкостінної листові оцинкованої сталі та легкого полістиролбетону. Характер руйнування плоских стійок показано на рисунку 16.



ПС150

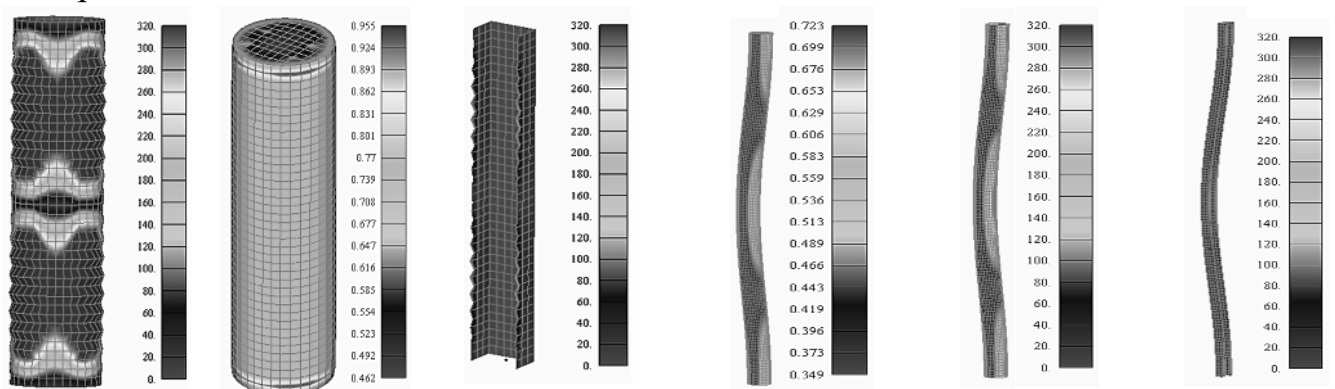
ПСБ150

ПСБО150

Рисунок 16. Характер руйнування решітчастої сталезалізобетонної стійки

Значення міцності експериментальних зразків наведено у таблиці 3.

У **третьому розділі** виконано чисельне моделювання всіх експериментальних зразків у програмному комплексі NASTRAN Femap 10.1.1 SC 64bit (Demo). Виконано підбір розмірів скінченних елементів за чотирма показниками: кількість скінченних елементів, кількість вузлів скінченних елементів, максимальні напруження, необхідний час для розрахунку. Прийнято рішення по розбивці об'ємної моделі бетону на гексаедри із розміром сторони 10 мм, що складає 2,5% висоти зразка, ці параметри дають необхідну точність при розрахунку сталезалізобетонних конструкцій з легких бетонів. Обов'язково виконувалось об'єднання співпадаючих вузлів скінченних елементів у єдине монолітне тіло. Прийняті фізико-механічні характеристики матеріалів задавались у вигляді діаграм та значень отриманих експериментальним шляхом.



а) сталевій трубі-оболонці

б) полістирол-бетонному ядрі

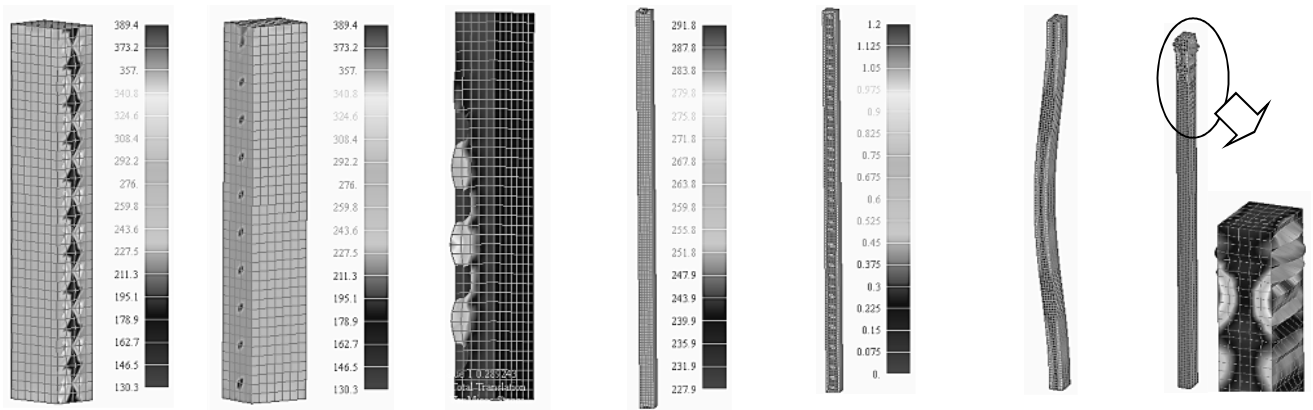
в) сталевому профілю внутрішнього армування

а) полістирол-бетонного ядра

б) сталевій трубі-оболонці

в) сталевому профілю внутрішнього армування

Рисунок 17. Головні напруження (МПа) та загальний вигляд деформування моделі ЦМБП40 та ЦМБП15



а) сталев оболонка б) бетонне ядро в) втрата стійкості оболонки а) сталев оболонка б) бетонне ядро в) загальна втрата стійкості г) місцева втрата стійкості

Рисунок 18. Головні напруження (МПа) та загальний вигляд деформування моделі ПМБ40 та ПМБ150

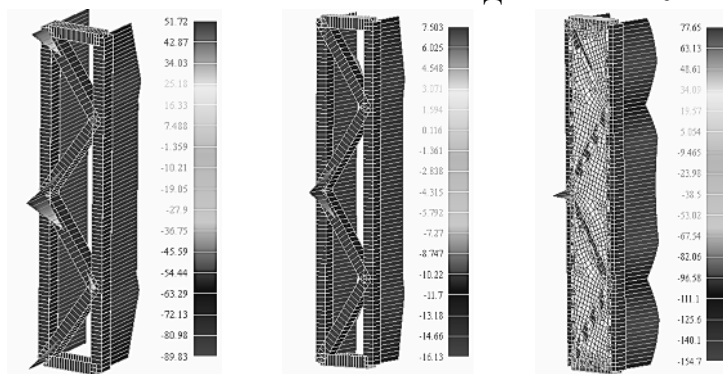


Рисунок 19. Розподіл головних напружень в сталевих профілях, МПа

На рисунках 17-19 наведено результати чисельного моделювання сталезалізобетонних конструкцій з легкого бетону із зазначеннями головних напружень в елементах.

На рисунку 20 наведено результати випробувань сталезалізобетонних конструкцій круглого перерізу довжиною 400мм та 1500мм.

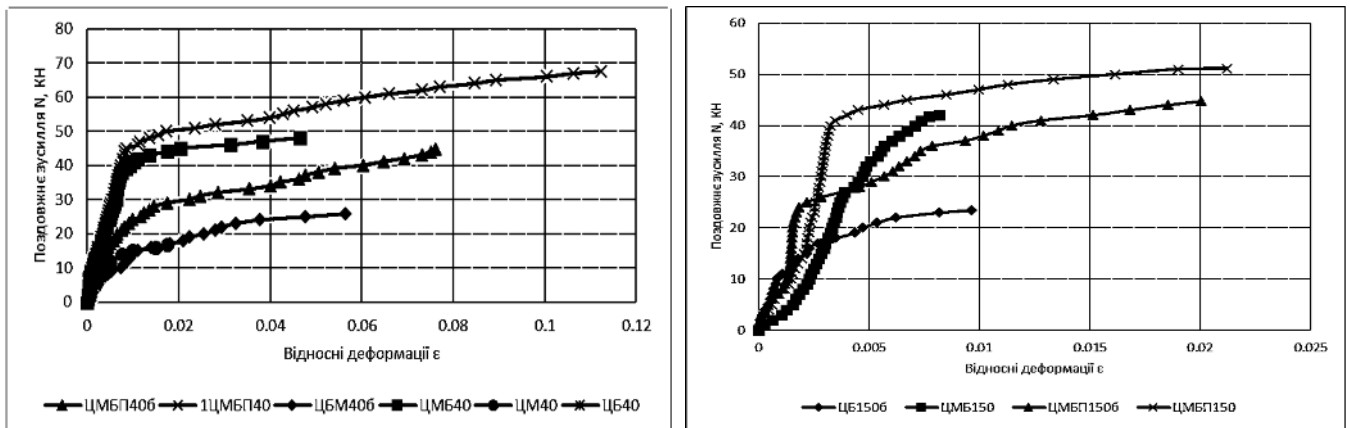


Рисунок 20. Залежність деформацій від навантаження конструкцій довжиною 400мм та 1500мм

Для зразків ЦБМ40б, ЦБМП40б, ЦБ150б, ЦБП150б навантаження передавалося тільки на бетонне ядро з сталевим профілем, інші зразки завантажені на весь переріз.

На рисунку 21 зображено графіки залежності деформацій від навантаження наскрізних стійок різних за своєю структурою. Навантаження на всі типи зразків прикладалося вздовж вісь що проходить через центр ваги конструкції.

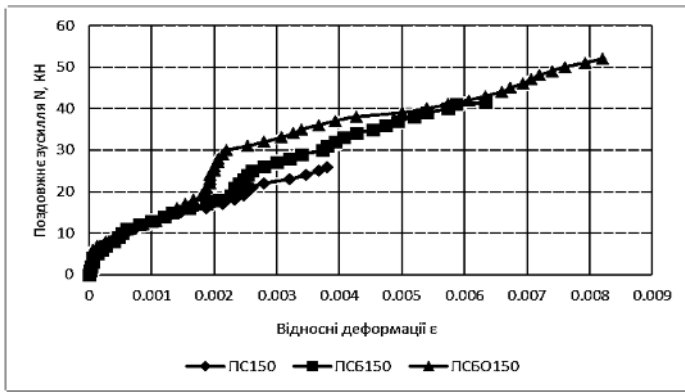


Рисунок 21. Графік залежності деформацій від навантаження сталезалізобетонних наскрізних стійок

$m_y$ ,  $m_u$  – коефіцієнт ефективності роботи труботетонної конструкції від навантаження  $N_y$ ,  $N_u$  відповідно.

Для порівняльного аналізу експериментальних випробувань з чисельним моделюванням досліджень сталезалізобетонних конструкцій з легких бетонів нанесено відповідні значення несучої здатності та відповідні відносні деформації.

Рисунки 22-23 характеризують роботу сталезалізобетонних конструкцій круглого та прямокутного перерізу довжиною 400мм та 1500мм. Навантаження прикладене на весь переріз.

Різниця обчислень міцності сталезалізобетонних конструкцій та результатів експерименту не перевищує 10%, що знаходиться у допустимих межах.

Таблиця 3

Несуча здатність експериментальних зразків

Серія зразків	Несуча здатність		$N_u/N_y$	Коефіцієнти ефективності роботи		Серія зразків	Несуча здатність		$N_u/N_y$	Коефіцієнти ефективності роботи	
	$N_y$	$N_u$		$m_y$	$m_u$		$N_y$	$N_u$		$m_y$	$m_u$
ЦМ40	13.8	16.5	1.20	-	-	ЦМБП40	45.8	67.3	1.47	0.42	0.74
ЦМ150	11.3	14.25	1.26	-	-	ЦМБП150б	38.4	44.8	1.17	0.35	0.49
ЦМБ40б	21.2	26.11	1.23	0.19	0.29	ЦМБП150	45.5	51.1	1.12	0.41	0.56
ЦМБ150б	18.3	23.27	1.27	0.17	0.26	ПМ40	11.3	12.7	1.12	-	-
ЦМП40	29.8	35.2	1.18	0.27	0.39	ПМ150	6.3	7.8	1.24	-	-
ЦМБХ40	40.5	44.3	1.09	0.37	0.49	ПМБ40	29.1	34.8	1.20	0.26	0.38
ЦМБ2Х40	43.5	48.2	1.11	0.39	0.53	ПМБ150	23.4	27.4	1.17	0.21	0.30
ЦМБ40	41.2	47.5	1.15	0.37	0.52	ПС150	15	25.8	1.72	-	-
ЦМБ150	36.2	41.8	1.15	0.33	0.46	ПСБ150	23.8	41.5	1.74	0.17	0.46
ЦМБП40б	32.5	44.3	1.36	0.30	0.49	ПСБО150	35.8	51.9	1.45	0.33	0.57

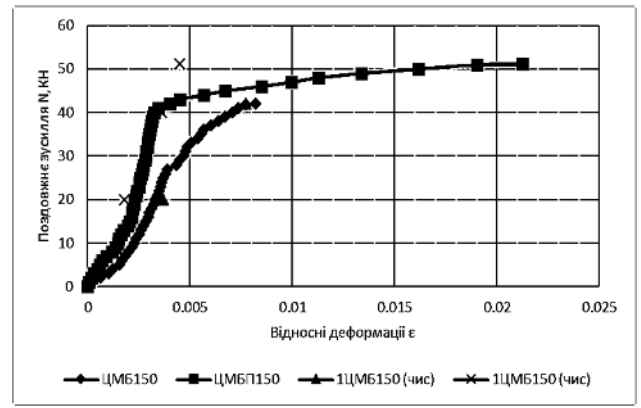
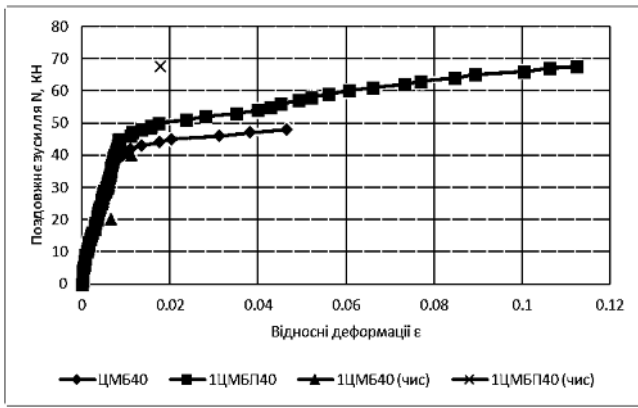


Рисунок 22. Графік залежності деформацій від навантаження в труробетонних конструкціях круглого перерізу довжиною 400мм та 1500мм

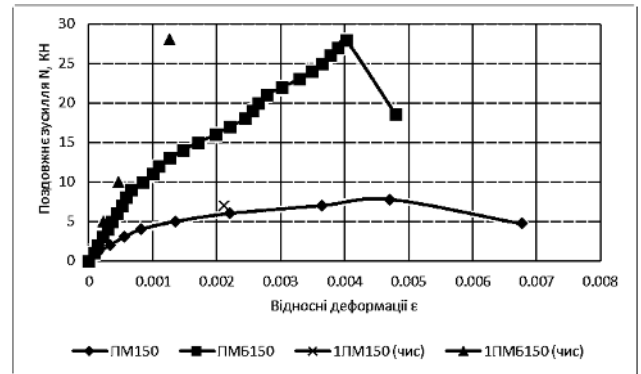
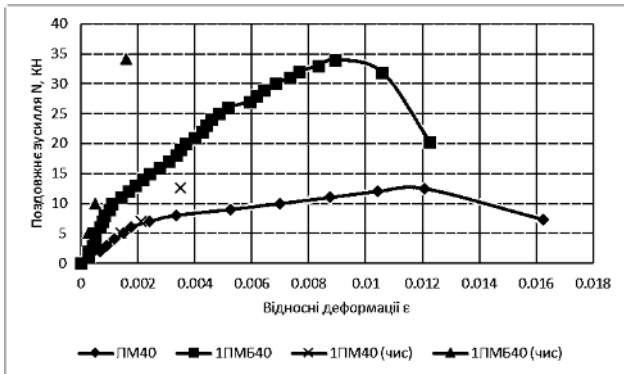


Рисунок 23. Графік залежності деформацій від навантаження труробетонних конструкцій прямокутного перерізу довжиною 400мм та 1500мм

У четвертому розділі описана адаптована методика розрахунку сталезалізобетонних конструкцій з легких бетонів.

Пропонується наступні формули підрахунку сталезалізобетонних конструкцій з легких бетонів круглого та прямокутного поперечного перерізу (рисунок 24).

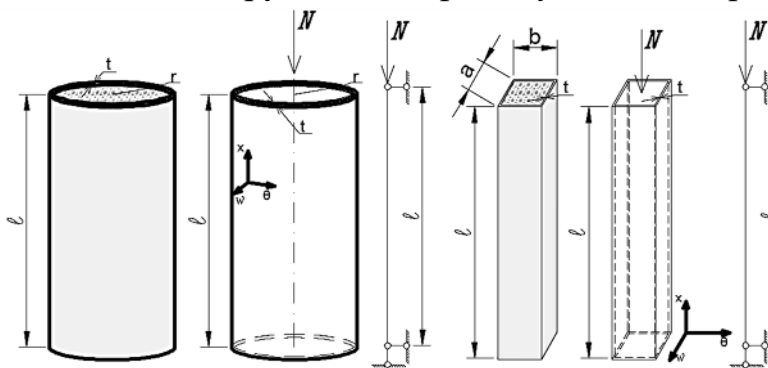


Рисунок 24. Розрахункові схеми трубних конструкцій

Загальна формула міцності на центральний стиск:

$$N_{Rd}^{cls} = N_{ls} + N_{lc} + N_{lp}, \quad (3)$$

де  $N_{Rd}^{cls}$  – характеристика несучої здатності легкого комбінованого перерізу

сталезалізобетонної конструкції;

$N_{ls}$  – характеристика несучої здатності тонкостінної сталеві оболонки:

$$N_{ls} = \alpha_s f_{yd} A_s, \quad (4)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт, що враховує роботу сталеві оболонки з урахуванням її стійкості:

$$\alpha_s = \frac{\sigma_s}{f_{yd}} \quad (5)$$

де  $A_s$  – площа поперечного перерізу сталеві обійми;

$f_{yd}$  – розрахунковий опір сталі;

$\sigma_s$  – напруження сталеві оболонки при центральному стиску:

$$\sigma_s = \sigma_{x,Rd} \quad (6)$$

де  $\sigma_{x,Rd}$  – критичне меридіональне напруження сталеві оболонки при поздовжньому згині.

$$\sigma_{x,Rd} = \chi f_{yk}, \quad (7)$$

де  $f_{yk}$  – характеристична межа текучості сталі:

$$f_{yk} = \frac{f_{yd}}{\gamma_{M0}}, \quad (8)$$

де  $\gamma_{M0} = 1,00$

$\chi$  – коефіцієнти послаблення втрати загальної стійкості

$$\chi = 1 \text{ при } \bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_0 \quad (9)$$

$$\chi = 1 - \beta \left( \frac{\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right)^n \text{ при } \bar{\lambda}_0 < \bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_p \quad (10)$$

$$\chi = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}^2} \text{ при } \bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda} \quad (11)$$

Значення відносної гнучкості  $\bar{\lambda}_p$  за межею пружності слід визначати за формулою:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1 - \beta}} \quad (12)$$

Параметри відносної гнучкості оболонки для різних складових напружень визначалися за формулами:

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{f_{yk} / \sigma_{x,Rcr}}, \quad \bar{\lambda}_\theta = \sqrt{f_{yk} / \sigma_{\theta,Rcr}}, \quad (13)$$

Пружне критичне меридіональне напруження при поздовжньому згині:

$$\sigma_{x,Rcr} = 0,605 E C_x \frac{t}{r} \quad (14)$$

Підставивши у загальну формулу (5) ці значення отримано наступний вираз:

$$\alpha_s = \frac{\sigma_s}{f_{yd}} = \frac{\chi f_{yk}}{f_{yd}} = \chi \quad (15)$$

$N_{lc}$  – характеристика несучої здатності легкого бетону працюючого у об'ємно-напруженому стані:

$$N_{lc} = \beta_c f_{cd} A_c \quad (16)$$

де  $\beta_c$  – коефіцієнт, який враховує роботу бетону у об'ємно-напруженому стані:

$$\beta_c = \frac{\sigma_{b,\tau}}{f_{cd}} \quad (17)$$

$\sigma_{b,\tau}$  – напруження у бетонному ядрі:

$$\sigma_{b,\tau} = f_{cd} + n \sigma_{\theta,Rd} \quad (18)$$

$n$  – коефіцієнт бокового обтиску:

$$n = \frac{\nu}{1-\nu} \quad (19)$$

Зведена формула коефіцієнту  $\beta_c$ :

$$\beta_c = \frac{f_{cd} + \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_{\theta, Rd}}{f_{cd}} \quad (20)$$

$\nu$  – коефіцієнт Пуассона бетону;

$$\frac{\sigma_{b, \tau}}{\sigma_{\theta, Rd}} \leq 1 \quad (21)$$

$\sigma_{\theta, Rd}$  – пружне критичне напруження колового стиску при поздовжньому згині;

$A_c$  – площа поперечного перерізу бетонного ядра;

$f_{cd}$  – розрахунковий опір бетону;

$$\sigma_z = \frac{dF}{dA}; \quad \sigma_{\theta} = \sigma_r; \quad (22)$$

Розрахункова схема бетонного ядра наведено на рисунку 25.

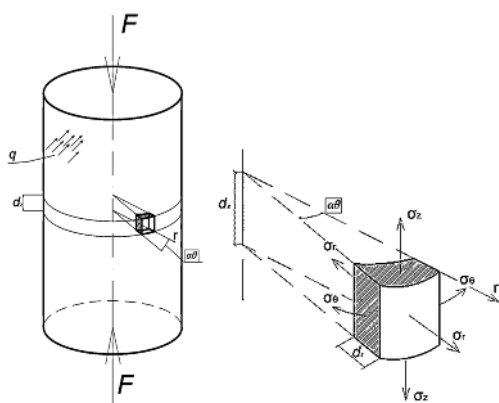


Рисунок 25. Розрахункова схема бетонного осердя

Узагальнений закон Гука в полярній системі координат:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_{\theta} + \sigma_r)]; \quad (23)$$

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{1}{E} [\sigma_{\theta} - \nu(\sigma_z + \sigma_r)]; \quad (24)$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_z + \sigma_{\theta})]; \quad (25)$$

якщо  $\varepsilon_{\theta} = 0$ ,  $\varepsilon_r = 0$  то:

$$0 = \frac{1}{E} [\sigma_{\theta} - \nu(\sigma_z + \sigma_r)] \rightarrow \sigma_{\theta} = \nu\sigma_z + \nu\sigma_r; \quad (26)$$

$$0 = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_z + \sigma_{\theta})] \rightarrow \sigma_r = \nu\sigma_z + \nu\sigma_{\theta}; \quad (27)$$

$$\nu\sigma_z = \sigma_{\theta} - \nu\sigma_r \rightarrow \sigma_z = \sigma_r \cdot \frac{1-\nu}{\nu}; \quad (28)$$

$$\nu\sigma_z = \sigma_r - \nu\sigma_{\theta} \rightarrow \sigma_z = \sigma_r \cdot \frac{1-\nu}{\nu}; \quad (29)$$

тоді:

$$\sigma_z = \frac{t}{r} \cdot \frac{1-\nu}{\nu}; \quad (30)$$

За формулою Лапласа:

$$\frac{\sigma_0}{r_0} + \frac{\sigma_m}{r_m} = \frac{q}{t}; \quad (31)$$

Для циліндричних елементів:

$$\frac{\sigma_m}{r_m} = 0, \quad (32)$$

так як  $r_m = \infty$ , тоді

$$\frac{\sigma_0}{r_0} = \frac{q}{t} \rightarrow \sigma_0 = \frac{q \cdot r_0}{t} \quad (33)$$

$N_{lp}$  – характеристика несучої здатності ЛСТК профілю:

$$N_{lp} = f_{ydp} A_{sp} \quad (34)$$

де  $A_{sp}$  – площа поперечного перерізу сталевго профілю;

$f_{ydp}$  – розрахунковий опір сталевго профілю у пружній стадії роботи.



Розрахунок сталеві оболонки із листової сталі циліндричної форми повинен враховувати втрату стійкості циліндричної оболонки до досягнення межі текучості сталі, що суттєво знижує міцність таких елементів. Для звичайних сталевих трубних конструкцій, які працюють як труботонні конструкції, понижуючий коефіцієнт визначається для  $\alpha_s=0.66$  зразків довжиною 400мм,  $\alpha_s=0.56$  - для зразків довжиною 1500мм.

Несуча здатність бетонного ядра залежить від об'ємно-напруженого стану, який виникає при тиску у сталевій циліндричній обоймі. Причому легкий бетон виконує потрібну функцію: сприймає зовнішні навантаження, забезпечує загальну стійкість додаткового сталевого профілю, підсилює сталеву обойму обмежуючи втрату місцевої стійкості у середині перерізу конструкції.

Розглянемо характеристику  $N_{lp}$  профілю, який знаходиться усередині сталеві оболонки та легкого бетону. Враховуючи характер руйнування трикомпонентних легких сталезалізобетонних зразків, які описують втрату загальної стійкості профілю, можна вважати, що тонкостінний профіль включається у роботу всім перерізом. Експерименти свідчать, що підсилення полістиролбетоном при повному бетонуванні виключає втрату місцевої стійкості навіть найтоншого профілю, тому визначення  $A_{eff}$  не потребується.

Слід зазначити, що залежність понижуючого коефіцієнту  $\chi$  (див. формули 9-11) має однакову відповідність до відносної гнучкості для циліндричних об'ємів довжиною до 400см радіусом до 20см з товщиною сталі від 0,4 мм до 1мм. Ця залежність зображена у вигляді діаграми (рисунок 26), яка побудована за теоретичними розрахунками для меридіонального осевого стиску.

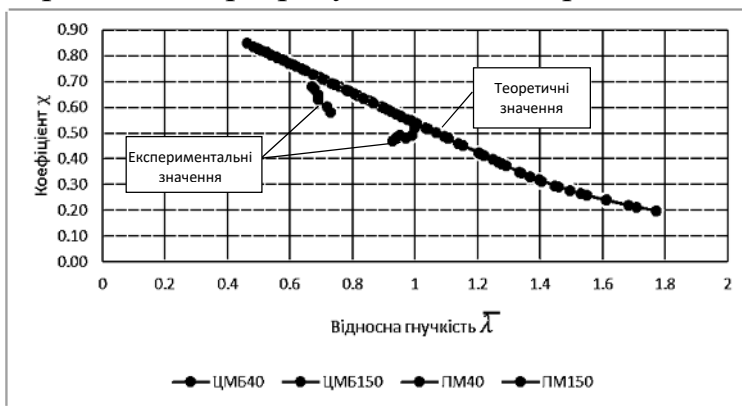


Рисунок 26. Діаграма залежності коефіцієнту  $\chi$  від відносної гнучкості  $\bar{\lambda}$ .

Напруження, які виникають у з'єднанні оболонки круглого перерізу, зображені на рисунку 27.

Максимальні напруження відносно кожної осі має наступний вигляд:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{b,\tau} R}{2t}, \quad (35)$$

У даному випадку  $\sigma_{b,\tau} = q_6$ .

Максимальні напруження відносно кожної осі має наступний вигляд:

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_{\theta,Rd}} \leq 1 \quad (36)$$

$\sigma_m$  – критичні напруження у поперечному напрямку відносно з'єднання сталеві оболонки;

$q_6$  – рівномірно розподілене навантаження на сталеву оболонку у поперечному перерізі від дії бетонного ядра у об'ємно-напруженому стані;

$R$  – радіус сталеві оболонки;  
 $t$  – товщина сталеві оболонки;



Рисунок 27. Розподіл напружень у циліндричних та прямокутних трубних елементах

$$\sigma_t = \frac{\sigma_{b,\tau} R}{t}, \quad (37)$$

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_{\theta,Rd}} \leq 1 \quad (38)$$

де  $\sigma_t$  – критичні напруження у поздовжньому напрямку відносно з'єднання сталеві оболонки.

З'єднання прямокутних конструкцій відбувається за допомогою заклепок без фальцювання при роботі на центральний стик розраховується на зріз заклепок.

Максимальні напруження відносно кожної осі має наступний вигляд:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{b,\tau} c}{2t}, \quad (39)$$

У даному випадку  $\sigma_{b,\tau} = q_b$ .

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_{\theta,Rd}} \leq 1 \quad (40)$$

$$\sigma_t = \frac{\sigma_{b,\tau} c}{t}, \quad (41)$$

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_{\theta,Rd}} \leq 1 \quad (42)$$

де  $c$  – товщина стійки.

$\sigma_c$  – критичні напруження у з'єднанні сталеві оболонки;

Зусилля розтягу у заклепкових з'єднаннях не повинно перевищувати максимальних напружень у бетонному ядрі. Алгоритм визначення несучої здатності заклепкових з'єднань описаний у вітчизняних нормах.

Підвищення міцності бетонного ядра відбувається тільки в обоймі, тому  $\gamma_c$  – для бетону за результатами випробувань трубобетонних конструкцій становить 2,7.

У відкритих перерізах «С» профілях та інших  $\gamma_s=1$  і підвищення міцності відбувається за рахунок збільшення стійкості сталевих профілів як  $\gamma_s \chi$ :

$$\gamma_s = \frac{N_{\text{експ}} - A_c \cdot f_{cd}}{\chi \cdot A_s \cdot f_{yd}} \quad (43)$$

Для запропонованих конструкцій коефіцієнт  $\gamma_s=1,1$ .

Порівняння результатів розрахунку за цими теоріями покаже ефективність використання кожної із них.

Всі розрахунки представлено у вигляді зведеної таблиці 5.

Результати розрахунку несучої здатності  $N_y$  за різними методиками

Найменування зразка	Довжина	Експериментальні випробування	Програмний комплекс Nastran	Приведений переріз за теор. пружності	Запропоновані розрахунки (формула 3).
	L, см	$N_{T1}$ , кН	$N_{T2}$ , кН	$N_1$ , кН	$N_{Rd}^{cls}$ , кН
ЦМБ40	40	41,2	39,83	47,25	40,74
ЦМБП40	40	45,8	71,89	60,03	43,78
ЦМБ150	150	36,2	44,63	47,25	34,12
ЦМБП150	150	45,5	54,21	60,03	43,32
ПМБ40	40	34,8	38,61	57,27	31,37
ПМБ150	150	27,4	32,46	40,25	25,68

Результати чисельного моделювання підтверджують експериментальні дослідження та теоретичні розрахунки (розбіжність визначена за результатами статистичного аналізу отриманих результатів, не перевищує 12%, середнє квадратичне відхилення 5%)

Результати різних методик підрахунку наведені у таблиці 5 у повній мірі дають оцінку ефективності і правильності цієї чи іншої методики. Прирівнявши всі запропоновані методики з експериментальними значеннями крім адаптованої мають завищені значення міцності експериментальних зразків. Якщо прийняти ці методики для розрахунку легких конструкцій руйнування відбудеться за рахунок критичних деформацій.

Адаптована методика враховує особливості роботи СЗБ конструкцій. Результати наведеної адаптованої методики у межах 28-50% від максимальних експериментальних значень кожного із запропонованих зразків.

### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті дослідження несучої здатності та деформативності легких СЗБ конструкцій із сталевих тонкостінних холодноформованих конструкцій та легкого бетону визначені науково-технічні задачі:

1. Розвинено методику виконання експериментальних несучої здатності та деформативності досліджені шляхом врахування особливостей роботи тонкостінної оболонки, легкого бетону та комбінованого з'єднання для визначення несучої здатності та деформативності СЗБ конструкцій з легких бетонів. Відхилення від експериментальних досліджень у середньому становить 12%, середнє квадратичне відхилення 5%.

2. За результатами підбору з'єднань оболонки легких труобетонних елементів із холодноформованих тонкостінних сталевих оцинкованих конструкцій визначено комплексне з'єднання з фальцю і заклепок, як найефективніше та технологічно придатне. В результаті дослідження сталевої обойми легких сталевих тонкостінних конструкцій виявлено утворення гофр при 60-70% від максимальних руйнуючих зусиль, що змушує розраховувати критичне значення несучої здатності за деформативністю сталі.
3. Виконано підбір раціонального складу легкого полістиролбетону як несучого та утеплюючого елементу для СЗБ стінових конструкцій. Прийнято бетон щільністю D750. В результаті експериментальних досліджень п'яти серій експериментальних зразків сталезалізобетонних конструкцій з легких сталевих тонкостінних конструкцій та легких бетонів загальною кількістю 96 штук виявлено суттєве до 70% збільшення їх несучої здатності за рахунок сумісної роботи складових матеріалів.
4. Проведено чисельне дослідження методом скінченних елементів напружено-деформованого стану експериментальних зразків. Скінченно-елементні моделі елементів відповідають реальним експериментальним дослідженням. Для створення скінченно-елементної сітки використовувалися скінченні елементи у формі гексаедра із розміром сторін 10мм, що складало 0.7-2.5% від максимальної довжини зразка. Такий розмір скінченних елементів обумовлений факторами виявлення концентрації напружень та можливостями обчислювальної техніки.
5. Результати чисельного моделювання підтверджують експериментальні дослідження (розбіжність, визначена за результатами статистичного аналізу отриманих результатів, не перевищує 9,5%), що вказують на достовірність уточненої теоретичної методики розрахунку та можливість використання чисельного моделювання при дослідженні легких сталезалізобетонних конструкцій.
6. На основі алгоритмів наведених у Eurocode 3, розвинено розрахунок сталевої оболонки сталезалізобетонних конструкцій з легких бетонів під навантаженням, який враховує втрату місцевої стійкості тонкостінної оболонки за допомогою понижуючого коефіцієнта  $\alpha$ . Для циліндричних експериментальних зразків довжиною 400мм коефіцієнт  $\alpha=0,66$ , довжиною 1500мм  $\alpha=0,56$ . Для прямокутного профілю  $\alpha=0,7$  Прийнята стала залежність коефіцієнту  $\chi$  від відносної гнучкості  $\bar{\lambda}$ . Характерна для циліндрів діаметром 100мм-400мм з товщиною стінки 0,4-1мм. Виведено коефіцієнт  $\beta_c=1,6$  для сталезалізобетонних конструкцій, який ураховує роботу бетону у обоймі із сталевої оболонки. Коефіцієнт умов роботи легких сталезалізобетонних конструкцій для сталевої оболонки  $\gamma_s=1,1$ , для бетонного ядра  $\gamma_c=2,7$  при навантаженні на бетонне ядро.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Сіробаба В.О. Порівняння доцільності використання ЛСТК та гнутих профілів для каркаса одноповерхових швидкокомтованих будівель / В.О. Сіробаба, О.П. Новицький, К.А. Зорабян // Металеві конструкції. 2013.–Т.19, №2.–С.129–136.

2. Велитченко С.Г. Моделювання та статистичне випробування сталевої рами легкоатлетичного манежу УАБС НБУ/ С.Г. Велитченко, О.П. Новицький, О.В. Орел, В.В. Піталенко, В.О. Сіробаба // Вісник Сумського національного аграрного університету: серія «БУДІВНИЦТВО». – Суми: СНАУ, 2014. – Вип. 10–С. 72–79.
3. Гудзь С.А. Порівняльна характеристика легких бетонів, які використовуються для підвищення несучої здатності ЛСТК / С.А. Гудзь, Ю.О. Авраменко, В.О. Сіробаба // Збірник наукових праць ПолтНТУ. Сер.: Галузеве машинобудування, будівництво. 2014. – Вип. 1. – С. 202–207.
4. Гудзь С.А. Особливості розрахунку сталезалізобетонних колон на позацентровий стиск / С.А. Гудзь, В.О. Сіробаба // Ресурсоекономні матеріали, конструкції будівлі та споруди: зб. наукових праць. – Рівне: НУВГП, 2014. – Вип. 29 – С. 129 – 136.
5. Семко О.В. Новий напрямок розвитку сталезалізобетону / О.В. Семко, Ю.О. Авраменко, В.О. Сіробаба // Проблеми й перспективи розвитку академічної та університетської науки. Збірник наукових праць за матеріалами ІХ Міжнародної науково-практичної конференції. – ПолтНТУ, 2016. – С. 316–319.
6. Семко О.В. Експериментальні дослідження з'єднання тонкостінних оцинкованих конструкцій / О.В. Семко, В.О. Сіробаба, Є.О. Загорулько // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури: зб. наукових праць. – Одеса: ОДАБА, 2017. – Вип. 69 – С. 58–63.
7. Oleksandr Semko, Viktor Dariienko, Vitaliy Sirobaba. Deformability of Short Steel Reinforced Concrete Structures on Light Concrete. International Journal of Engineering & Technology. Vol. 7, № 3.2, (2018), pp. 370–375.
8. Семко О.В. Міцність та деформативність сталезалізобетонних конструкцій складеного перерізу на легких бетонах / О.В. Семко, Н.М. Магас, В.О. Сіробаба // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту: зб. наукових праць. Харків: УкрДУЗТ, 2018 – Вип. 178 – С. 123–130.

## АНОТАЦІЯ

**Сіробаба В.О. Несуча здатність та деформативність сталезалізобетонних конструкцій з легких бетонів. - На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Полтава:

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, 2018. – 175с.

У дисертації досліджено міцність та деформативність сталезалізобетонних конструкцій з легкого бетону. Проаналізовані відомі методики розрахунку сталезалізобетонних конструкцій.

Проведено експериментальні дослідження сталезалізобетонних конструкцій з легких бетонів. Підібраний оптимальний клас бетону за міцністю та теплопровідністю для сталезалізобетонних конструкцій. Виконано підбір з'єднання сталевих оцинкованих конструкцій. Із наведених з'єднань найбільш ефективним

визначено поєднання двох видів з'єднань: фальцеве із заклепковим на сталевих заклепках.

Наведено алгоритм чисельного моделювання при якому визначені місця концентрації напружень у конструкції. Наведено графіки деформативності зразків, які свідчать про сумісну роботу сталевої оболонки та бетонного ядра. Порівняно отримані результати експериментальних випробувань з чисельним моделюванням.

Представлений адаптований розрахунок сталезалізобетонних конструкцій з легких бетонів із врахуванням всіх особливостей роботи компонентів конструкції. Порівняно інженерні методи з теоретичними та експериментальними дослідженнями.

**Ключові слова:** сталезалізобетон, полістиролбетон, чисельне моделювання, міцність, стійкість, метод скінченних елементів.

## АННОТАЦИЯ

**Сиробаба В.А. Несущая способность и деформативность сталежелезобетонных конструкций из легких бетонов. - На правах рукописи.** Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 - строительные конструкции, здания и сооружения. - Полтава:

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, 2018. - 175с.

В диссертации исследованы прочность и деформативность сталежелезобетонных конструкций из легкого бетона. Проанализированы известные методики расчета сталежелезобетонных конструкций.

Проведены экспериментальные исследования сталежелезобетонных конструкций из легких бетонов. Подобранный оптимальный класс бетона по прочности и теплопроводности для сталежелезобетонных конструкций. Выполнен подбор соединения стальных оцинкованных конструкций. Из приведенных соединений наиболее эффективным определено сочетание двух видов соединений: фальцевое с заклепчным на стальных заклепках.

Приведен алгоритм численного моделирования при котором определены места концентрации напряжений в конструкции. Представлены графики деформативности образцов, которые свидетельствуют о совместной работе стальной оболочки и бетонного ядра. Получены результаты сравнения экспериментальных испытаний с численным моделированием.

Представлен адаптированный расчет сталежелезобетонных конструкций из легких бетонов с учетом всех особенностей работы компонентов конструкции. Получены результаты сравнения инженерной методики с теоретическими и экспериментальными исследованиями.

**Ключевые слова:** сталезалезелезобетон, полистиролбетон, численное моделирование, прочность, устойчивость, метод конечных элементов.

**ABSTRACT****Sirobaba V.O. Bearing capacity and deformability of steel reinforced concrete structures made of lightweight concrete. – Manuscript.**

Thesis for PhD degree in specialty 05.23.01 – building structures, buildings and structures. – Poltava: Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, 2018. – 175p.

In the presented paper, experimental, numerical and theoretical research of steel-reinforced constructions made of lightweight concrete have been performed. The relevance of the paper is due to the flimsiness of construction, the possibility of using this type of design both in the new construction and in the reinforcement of existing steel structures.

According to the results of experimental research, the physical and mechanical characteristics of the received materials, the bearing capacity of each of the types of experimental samples and the character of the destruction are described. The diagram of the destruction of each sample is clearly shown.

The choice of connections of steel zinned constructions is done. From the above compounds the most effective combination of two types of connections is defined: folding with rivets on steel rivets (rebated with riveted connection on steel rivets). The work of polystyrene concrete in a closed space of the pipe element increases the bearing capacity of the concrete core by an average of 2 times.

The numerically investigated the stress-strain state of pipe concrete structures, which resulted in graphic representations of main stresses in an element using the Femap software system. The places of concentration of stresses and their distribution depending on the geometrical features of construction of each type of structures are determined.

The graphs of the deformability of samples which testify to the co-operation of the steel shell and the concrete core are presented. Also, there is a comparison of the calculations of the software complex with experimental research, the discrepancy of which is in the range of up to 10%, it gives an opportunity to design steel-reinforced concrete constructions made of lightweight concrete in software complexes with sufficient accuracy.

The calculation of the corresponding constructions according to the existing analytical methods of calculation. The analysis of these calculations proved that the generally accepted calculation formulas do not take into account the peculiarities of the operation of thin-walled steel elements, with the loss of their local stability, and the work of light weight concrete in a closed steel shell. Therefore, the results of the approximate calculations do not correspond to the real condition of the work of ultralight weight steel reinforced concrete structures. It is proposed to adapt the method of calculation of constructively new designs with the appropriate instructions for use. A comparison of engineering methods for calculating of theoretical and experimental researches, which showed the discrepancy between the proposed calculation method and experimentally obtained structural strength data in the range of 5-10%. Accepted coefficients of efficiency of the steel element  $\alpha = 1.1$ , lightweight concrete in a steel shell  $\beta = 2.7$ .

**Key words:** steel reinforced concrete, polystyrene concrete, numerical simulation, strength, stability, finite element method.

Підписано до друку 01.11.2018 р.  
Папір офсетний. Друк трафаретний.  
Ум. друк. арк. 0,9. Наклад 100 прим. Формат 60×84/16. Зам. № 862.

Виготовлювач: ТОВ “Фірма “Техсервіс”.  
Адреса: 36011, м. Полтава, вул. В. Міщенко, 2.  
Тел.: (0532) 56-36-71.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 4421 від 16.10.2012 р.