

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра будівельних, дорожніх машин і будівництва

Допустити до захисту

зав. кафедрою БДМБ
канд. техн. наук, професор

" ____ " _____ 2024р.

Настоящий В.А.

КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему: «Дослідження варіантів оптимізації комбінованої арочної
конструкції»

ДКД 19239 А

Альбом документів

Виконав здобувач освіти гр. БІ-23М-2

спеціальності 192 «Будівництво та
цивільна інженерія»

" ____ " _____ 2024 р.

Торжинський Д. А.

Керівник магістерської роботи

канд. техн. наук, доцент

" ____ " _____ 2024 р.

Портнов Г.Д.

Кропивницький - 2024рік

Центральноукраїнський національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет, відділення **БТ**

Кафедра, циклова комісія **будівельні, дорожні машини і будівництво**

Освітньо-кваліфікаційний рівень **магістр**

Спеціальність **192 «Будівництво та цивільна інженерія»**

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри БДМБ

к.т.н. проф. Настоящий В.А.

“ ____ ” _____ 2024 року

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну магістерську роботу

Торжинський Дмитро Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) **«Дослідження варіантів оптимізації комбінованої арочної конструкції»**

керівник проекту (роботи) *канд. техн. наук, доцент Портнов Г.Д. ,*
затверджені наказом вищого навчального закладу від “ ____ ” ____ 2024 року № _____

2. Строк подання студентом проекту (роботи) *10.11.2024*

3. Вихідні дані до проекту (роботи): : паспорт автосалону фірми "Skoda Auto»
ПРОМБЕЗПЕКА, м. Кропивницький

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *1. Науково-дослідний розділ. 2. Охорона праці.*

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

Плакати мультимедійної презентації (Не менше 10 плакатів, які ілюструють методику та результати досліджень)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Науково-дослідний розділ	доцент Портнов Г.Д.		
Охорона праці	доцент Дарієнко В.В.		

7. Дата видачі завдання

10. 01. 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Виконання науково-дослідного розділу	10. 09 - 10. 11.24	
2	Розробка заходів з охорони праці	10. 09- 05. 11.24	
3	Оформлення альбому документів	01. 11 - 10. 11.24	

Здобувач

(підпис)

Торжинський Д.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

Портнов Г.Д.

(прізвище та ініціали)

Формат	Зона	Позиція	Позначення	Найменування	Кількість	Примітки
				Документація загальна		
				<u>Знову розроблена</u>		
				Анотація	1	
				SUMMARY	1	
A4			ДКД 19239 ПЗ	Пояснювальна записка	84	
			ДКД 19239 ІМ	Додаток А Ілюстраційні та графічні матеріали (мультимедійна презентація)	17	
				<u>Документація з</u>		
				<u>конструктивного розділу</u>		
				<u>Знову розроблена</u>		
A1			ДКД 19239 КМ 01	План колон на відм. 0,000 ,Схема розташування ферм і зв'язків по верхніх поясах, схема розташування прогонів	1	
A1			ДКД 19239 КМ 02	Розріз 1-1 (М1:100), вузли 1,3,4 (М1:10)	1	
A4			ДКД 19239 КМ 03	Колона К1, Колона К2, Вертикальна в'язь Вз-1	1	
A1			ДКД 19239 КМ 04	Ферма Фс-1(1:50), Вузол 1 (1:20), Розрахункова схема ферми (1:100).	1	

					ДКД 2213312 ВД			
Зм	Лист	№ документа	Підпис	Дата	Дослідження варіантів оптимізації комбінованої арочної конструкції Відомість дипломного проекту			
Розробив	Торжинський Д.А.							
Перевірив.	Портнов Г.Д.							
Н. контр.	Яцун В.В.							
Затвердив.	Настоящий В.А.				ЦНТУ гр БІ-23М-2			

АНОТАЦІЯ

Дана робота присвячена розробці алгоритму дослідження напружено-деформованого стану варіантів оптимізації комбінованої арочної конструкції на моделях розрахункових схем, створених в середовищі сучасного програмного комплексу.

Об'єкт дослідження – просторова конструкція, з плоских металевих рам, які складаються з арочної ферми та чотирьох колон.

В процесі дослідження створена скінчено елементна модель просторової металевої конструкції; проведений аналіз напружено-деформованого стану елементів основної конструкції; обґрунтований критерій оптимізації; здійснено порівняння досліджуваних варіантів моделі для виявлення раціональних конструктивних рішень за критерієм металоємності; запропонований варіант технічного рішення об'єкта дослідження (на рівні проектної пропозиції); досліджені зміни матеріаломісткості отриманих варіантів з метою визначення раціональних рішень; розроблений алгоритм оптимізації конструкції в середовищі ПК.

Ключові слова: металевий каркас, арочна ферма; метод скінчених елементів; металоємність

ABSTRACT

This work is devoted to the development of an algorithm for studying the stress-strain state of optimization options for a combined arched structure using models of calculation schemes created in a modern software environment.

The object of the study is a spatial structure made of flat metal frames consisting of an arched truss and four columns.

In the process of the study, a finite element model of a spatial metal structure was created; the stress-strain state of the main structure elements was analyzed; the optimization criterion was substantiated; the studied model variants were compared to identify rational design solutions according to the metal-intensiveness criterion; a variant of the technical solution of the research object was proposed (at the level of the project proposal); changes in the material consumption of the obtained variants were studied in order to determine rational solutions; an algorithm for optimizing the structure in a PC environment was developed.

Keywords: metal frame, arched truss; finite element method; metal-intensiveness

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1 Розділ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	5
2 Розділ 2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	10
3 Розділ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ	20
4. Розділ 4 РОЗРОБКА МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЇ РАМИ КАРКАСУ ..	28
4.1 Загальні вимоги	28
4.2 Вимоги уніфікації та технологічні обмеження	29
4.3 Результати оптимізації	30
4.4 Обрані жорсткості елементів	33
5. Розділ 5 РОЗРАХУНКИ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЇ РАМИ КАРКАСУ..	46
ВИСНОВКИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДОСЛІДЖЕНЬ	61
CONCLUSIONS FROM THE RESULTS OF THE RESEARCH	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	62
ДОДАТОК 1 Розділ 6 ОХОРОНА ПРАЦІ	66

					ДКД 19239 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження варіантів оптимізації комбінованої арочної конструкції <u>Пояснювальна записка</u>	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.	Торжинський					М	2	84
Перевір.	Портнов							
Н.контр.	Дарієнко							
Затвер.	Настоящий							
						ЦНТУ гр БІ-23М-2		

ВСТУП

Актуальність теми. В основу проектування металевих конструкцій покладені принципи: економія металу, зниження трудомісткості виготовлення і скорочення термінів монтажу.

З впровадженням в конструкторську діяльність програмних комплексів виникає необхідність розробки нових методів оптимізації конструкцій на основі варіантного проектування.

Використання програмних комплексів представляє нові можливості у вдосконаленні варіантного проектування шляхом розгляду практично великого числа варіантів.

Зміст роботи: інженерно-технічна розробка з елементами наукових досліджень, зорієнтованими на розв'язання конкретної прикладної науково-технічної задачі в галузі будівництва.

Мета дослідження. Мета роботи – розробка алгоритму дослідження напружено-деформованого стану варіантів оптимізації комбінованої арочної конструкції на моделях розрахункових схем, створених в середовищі сучасного програмного комплексу.

Завдання дослідження.

З поставленої мети витікають наступні завдання:

- створити скінчено-елементної моделі просторової металевої конструкції;
- провести аналіз напружено-деформованого стану елементів основної конструкції, що несе;
- обґрунтувати критерій оптимізації;
- здійснити порівняння досліджуваних варіантів моделі для виявлення раціональних конструктивних рішень за критерієм металоємності;

- запропонувати варіант технічного рішення об'єкта дослідження (на рівні проектної пропозиції);
- дослідити зміни матеріаломісткості отриманих варіантів з метою визначення раціональних рішень;
- розробити алгоритм оптимізації конструкції в середовищі ПК.

Об'єкт дослідження. Наявна несуча конструкція – просторова, з плоских металевих рам, які складаються з арочної ферми та чотирьох колон. Конструкція статично невизначена. Ступінь статичної невизначеності залежить від співвідношення жорсткості вузлів сполучення елементів конструкції.

Предмет дослідження. Тема КМР «Дослідження варіантів оптимізації комбінованої арочної конструкції.» зорієнтована на розв'язання задачі проектування конкретного будівельного об'єкта: автосалону в м.Кропивницький.

Метод дослідження. Тема орієнтується на моделюванні й дослідженні роботи будівельної конструкції із використанням ПК SCAD.

Наукова та технічна новизна одержаних результатів. Розроблена методика варіантного проектування металевої конструкції за критерієм мінімальної металоємності за допомогою ПК SCAD.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоноване конструктивне рішення несучої рами каркасу будівлі зі зменшеною металоємністю в порівнянні з діючим проектом.

Апробація та публікація результатів роботи. *Результати досліджень опубліковані в статті «Пошук раціональної схеми рами» /Тези доповідей студентів і магістрантів на XLVIII науковій конференції 17 квітня 2014 року с.89-93. Кіровоград: КНТУ, 2014.– 883 с./.*

Структура роботи. Робота складається з _4_ аркушів креслень, _30_ слайдів мультимедійної презентації, альбому документів на _100_ сторінках, у тому числі _17_ таблиць, _24_ рисунків, списку з _39_ використаних джерел. Текст пояснювальної записки містить вступ, _7_ розділів, висновки і рекомендації за результатами роботи, список використаних джерел.

					ДКД 19239 ПЗ		Арк.
							4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Розділ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Зниження витрати матеріалів є найважливішою умовою вибору раціональної конструктивної форми споруди.

Маса конструкції залежать від геометричних і фізичних параметрів споруди.

Для стержневих конструкцій геометричні параметри включають:

- схему споруди, що визначає контури осей окремих елементів і розміщення шарнірів;
- типи і розмір поперечних перерізів стержнів;
- розміри вузлових з'єднань елементів між собою.

Фізичні параметри конструктивної форми визначають:

- механічні характеристики матеріалу конструкції;
- величини початкових зусиль, напружень та переміщень в елементах і їх окремих точках .

В процесі проектування об'єкт змінюється в архітектурному і конструктивному плані і вимагає постійного перерахунку.

Вибір оптимального рішення здійснюється на основі варіантного проектування з використанням обчислювальних комплексів, заснованих на чисельних методах розрахунку конструкцій.

Одним з основних чисельних методів для розрахунку будівельних конструкцій є метод скінчених елементів (МСЕ). На сьогодні на основі МСЕ створена багато обчислювальних комплексів, у тому числі "Інтегрована система аналізу міцності та проектування конструкцій Structure CAD Office" (SCAD)[5].

На сьогодні проведені роботи по дослідженню просторових конструкцій різних споруд [10-20, 25-38]. Найбільший інтерес представляють: футбольний

					ДКД 19239 ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стадіон в Бразі [25, 26], Олімпійський стадіон в Монреалі [27], стадіони в Шанхаї [28], Піреї [38] і Римі [33].

Велика частина робіт присвячена проблемам проектування, дослідженням їх роботи в умовах експлуатації і не порушує питання аналізу конструкцій на основі чисельних методів зі створенням розрахункової моделі споруди і аналізу напружено-деформованого стану елементів покриття.

Окремі випадки оптимізації будівельних конструкцій приведені в роботах [18, 19, 39-40], дослідження покриттів стадіонів в Бразі [25-26] і Монреалі [27].

Прикладні задачі оптимального проектування металевих конструкцій полягають у пошуку значень невідомих параметрів системи, які забезпечують екстремальне значення вибраного критерію оптимальності в області допустимих проектних рішень.

У більшості робіт з оптимізації металевих конструкцій розглядаються параметричні задачі, обмежені попереднім визначенням конструктивної форми при можливості зміни її параметрів. Обрання конструктивного рішення об'єкта, приймається на стадії технічного проекту. Оптимізація обраної конструктивної форми здійснюється варіюванням її параметрів при заданій конструктивній формі, умова закріплення на опорах, характеру з'єднання елементів у вузлах та діючих навантажень.

Подальший розвиток теорії оптимального проектування металевих стержневих систем передбачає розв'язання задачі пошуку оптимальної топології конструкції та форми перерізів її елементів при змінних параметрах системи. Такі задачі відносять до задач структурно-параметричної оптимізації, що мають ряд особливостей.

В таких задачах одночасно є присутніми змінні неперервного та дискретного типів.

При структурних перетвореннях конструкції змінюються кількість та характер змінних проектування і функцій обмежень та критерію оптимальності. Область пошуку може бути негладкою, а окремі її частини мають різну вимірність, або можуть мати різний набір змінних.

Математична модель задачі оптимального проектування конструкцій об'єднує критерій якості з незалежними змінними проектування з обмеженнями, які відображають у загальному випадку нелінійні взаємозв'язки. Така модель створюється з врахуванням можливостей методу її розв'язання, що пояснює велике методів розв'язання задач оптимального проектування конструкцій.

У залежності від типу функції мети виділяються детерміновані, імовірнісні та багатокритеріальні постановки задач оптимізації.

Найбільшого розповсюдження набули детерміновані математичні моделі, у яких визначений критерій оптимальності проекту описує один із показників ефективності конструкції.

Найчастіше в задачах оптимізації металевих конструкцій застосовують критерії матеріаломісткості.

Найпростіші критерії оптимальності є достовірними при проектуванні систем з фіксованою геометричною схемою.

У задачах, що передбачають варіацію геометричних параметрів системи, вишукується оптимальне значення найбільш узагальненого критерію.

Критерій енергомісткості виражається через відношення дійсної енергії, яка використана на припустиме деформування конструкції, до гранично допустимої потенціальної енергії.

Цей комплексний показник є критерієм ефективного використання матеріалу в конструкціях і зветься коефіцієнтом використання матеріалу.

Водночас критерій енергомісткості оцінює досконалість несучої конструкції по відношенню до процесу перетворення енергії зовнішніх сил в потенціальну енергію деформації.

Критерій енергомісткості застосовують для оцінки раціональних проектних рішень при змінних геометричних і структурних параметрах системи.

Імовірнісні постановки задач враховують вплив фактору часу, випадкову природу властивостей конструкції й імовірнісну мінливість зовнішніх впливів. При цьому використовується критерій надійності як імовірність того, що за час експлуатації конструкції її параметри вийдуть з області припустимих значень.

Проектування з врахуванням імовірності відмови конструкції через визначений час її експлуатації та виконання ремонтних робіт потребує статичну обробку банку даних. Така інформаційна база створюється при дослідженні технічного стану реальних об'єктів та аналізі умов їх роботи. Недостатня вивченість статистичних властивостей процесів в будівельних конструкціях обмежує використання імовірнісних методів оптимізації.

Ряд праць присвячено розробці критеріїв надійності для задач оптимізації металевих конструкцій, а також їх економіко-математичному обґрунтуванню.

Основним показником експлуатаційної надійності конструкції протягом експлуатації є імовірність безвідмовної роботи. У задачах оптимального проектування конструкцій з врахуванням безпеки експлуатації цю імовірність розглядають як функцію, що залежить від часу, проектних параметрів конструкції та параметрів системи технічного обслуговування.

Практика експлуатації металоконструкцій привела до вирішення задач оптимізації металевих конструкцій за критерієм надійності. Розглядається задача мінімізації повних очікуваних витрат: вартості зведення та експлуатації конструкції. Визначаються такі значення проектних параметрів і така система технічного обслуговування конструкції, при яких досягається компроміс між проектною масою та експлуатаційною надійністю системи.

Кількісно оцінити усі негативні фактори, що впливають на технічний стан конструкції протягом експлуатації практично неможливо. Модель надійності конструкції розробляють з використанням статистичної інформації, яка отримана за результатами технічного обстеження аналогічних об'єктів.

Задачі багатокритеріальної оптимізації характеризуються критерієм оптимальності у формі вектору показників ефективності проектного рішення. Такі задачі відкривають можливість для дослідження широкого кола альтернативних проектів з різними цільовими функціями та вибору компромісного рішення. Така постановка у найбільшій мірі відповідає задачам проектування, результати якого залежать від багатьох критеріїв.

При аналізі векторних критеріїв якості виникають труднощі, пов'язані з тим, що вони можуть знаходитись на різних ієрархічних рівнях системи оцінки конструкції. Врахування такої ієрархічності вимагає використання відповідних моделей і методів розв'язку задач оптимального проектування конструкцій. / Пелешко І. Д., Юрченко В. В. Про удосконалення одного з методів оптимізації сталевих конструкцій // Вісник Державного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва. — 1998. — № 360. — С. 166-174./ Пелешко І. Д., Юрченко В. В. Застосування генетичних алгоритмів для пошуку оптимальних проектних рішень металевих конструкцій // VIII Українська науково_технічна конференція "Металлические конструкции: взгляд в прошлое и будущее". Сборник докладов. — Часть 1 / Под ред. Шимановского А. В. — К.: Сталь, 2004. — С.250-260/.

Необхідність розробки алгоритмів оцінки раціональності конструктивних рішень споруд стосовно конкретних обчислювальних комплексів залишається актуальною. Найбільш близькою до цього дослідження є робота [24].

Розділ 2

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Методика дослідження базувалася на здібності ПК "SCAD" оптимізувати перерізи сталевих конструкцій по вказаних критеріях, реалізованої в постпроцесорі "Перевірка несучої здатності сталевих перерізів".

На основі розгляду проектної документації об'єкту приймалася розрахункова схема для проведення статичного розрахунку.

При створенні моделі розрахункової схеми в SCAD виділені наступні групи елементів конструкції покриття: арочна ферма, колони, стійки, конструкції, що захищають.

Діючі навантаження представлені постійним - від ваги конструкції, що несе, а також постійним навантаженням від ваги покрівлі, тимчасовим - сніговим і короткочасним - технологічним.

Вітрові, температурні і інші навантаження на цьому етапі не розглядалися.

Цільовою функцією була умовна матеріаломісткість, відповідна власній вазі G моделі металевої конструкції арочного каркаса за умови збереження несучої здатності усіх її елементів.

Значення цільової функції визначалося за допомогою постпроцесора SCAD "Перевірка несучої здатності сталевих перерізів".

Для спрощення порівняння були прийняті наступні гіпотези:

- Усі елементи конструкції виконані із сталі з однаковими механічними властивостями.
- Гранична гнучкість усіх елементів конструкції однакова.
- Прийняті для розглянутих моделей ферм типи решітки істотно не впливають на вигляд цільової функції

Жорсткості елементів конструкції вибиралися з сортаменту «Труби електрозварюванні прямошовні за ГОСТ 10704- 91».

На першому етапі вирішувалося завдання пошуку раціональної схеми споруди при зміні:

1. Умов сполучення ригеля з колонами.
2. Форми крізного ригеля (ферми).
3. Жорсткості вузлів сполучення ферм.

Для усіх отриманих моделей були пораховані значення умовної матеріаломісткості.

На основі зіставлення отриманих результатів приймалося рішення про доцільність вибору геометричної схеми об'єкту.

Наступним етапом було опрацювання обраної конструктивної схеми об'єкту відповідно до вимог уніфікації.

Отримані в процесі опрацювання конструктивної схеми зміни вносилися до моделі обраної геометричної схеми.

Другий етап дослідження включав перевірку знов утвореної схеми на можливі поєднання постійних, тимчасових і короткочасних навантажень, включаючи вітрові, а також можливість нерівномірного снігового навантаження.

Отримані в процесі опрацювання конструктивної схеми зміни вносилися до моделі вибраної геометричної схеми.

Третій етап дослідження включав перевірку знов утвореної схеми на можливі поєднання постійних, тимчасових і короткочасних навантажень, включаючи вітрові, температурні завантаження, а також можливість нерівномірного снігового навантаження.

На основі отриманих результатів виконувалася розробка рами конструкції, що несе.

Власна вага конструкцій була задана автоматично за допомогою функції завдання власної ваги. Технологічні навантаження були прикладені на відповідні вузли і елементи згідно з схемою навантажень.

Снігове навантаження прикладалося до елементів покриття, що захищають. Розглядалися 2 варіанти снігового завантаження: з рівномірним розташуванням снігу по усьому покриттю і по кожній половині покриття.

Вітрове навантаження прикладалося до елементів, що захищають, за двома напрямками.

У рамках виконання дослідницької ВКР сейсмічні навантаження не враховувалися.

Розрахункові поєднання зусиль задавалися автоматично залежно від типу завантаження і виду навантаження, після чого виконувався статичний розрахунок схеми.

Блок-схема оптимізації конструкції представлена на рисунку 2.1

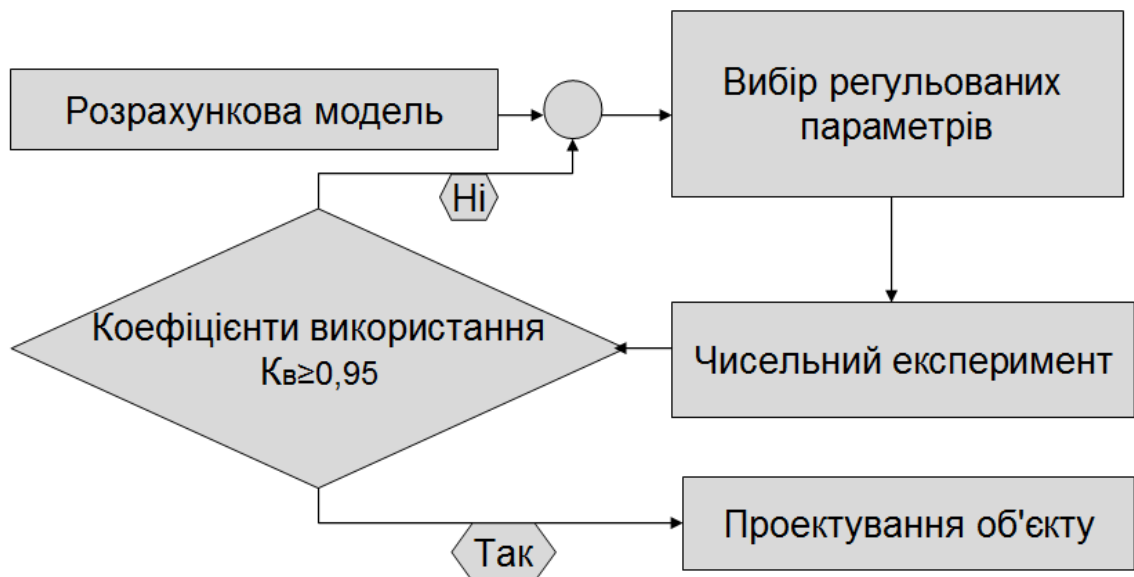


Рисунок 2.1 Блок-схема оптимізації конструкції

Чисельний експеримент проводиться в середовищі SCAD за допомогою постпроцесора «Перевірка несучої здатності сталевих перерізів».

Постпроцесор призначений для перевірки (експертизи) здатності стержневих елементів сталевих конструкцій відповідно до вимог ДБН В.2.6-198:2014 "Сталеві конструкції".

Поперечні перерізи стержнів можуть бути з поодиноких прокатних профілів, із зварних двотаврових і коробчастих перерізів, заданих як параметричні перерізи, а також із зварних перерізів довільної конфігурації.

В деяких випадках конструктивний елемент може складатися тільки з одного стержневого кінцевого елементу. Коли такі властивості має ряд окремих стержневих елементів (наприклад, стійки або розкоси ферми), то вони можуть бути об'єднані в групи і перевірка несучої здатності виконується для усієї групи конструктивних елементів. Обов'язковими умовами для елементів, що входять до групи являються :

- однаковий тип перерізу;
- однаковий тип кінцевих елементів;
- однакові коефіцієнти розрахункової довжини.

Для усіх елементів, що входять до складу конструктивних елементів і груп конструктивних елементів, мають бути вичислені розрахункові поєднання зусиль.

Інструкція по проведенню чисельного експерименту представлена в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Крок	Операція	Коментарії
1	Установка параметрів	Коефіцієнт умов роботи задається в інтервалі 0.7...1.2, а гранична гнучкість - 120...400. Клас сталі вибирається із списку класів сталей,
2	Призначення конструктивних елементів	Задаються характеристики елемента: ім'я елемента, коефіцієнти розрахункової довжини, параметри налаштування, що задаються у вікні. При призначенні коефіцієнтів розрахункової довжини слід виходити з відстані між точками закріплення елемента в реальній

		конструкції і характеру цього закріплення.
3	Призначення груп конструктивних елементів	У тих випадках, коли конструктивний елемент містить тільки один стержень, є можливість об'єднати такі стержні в групи і виконувати перевірку і уніфікацію на рівні груп. Заміна перерізу виконується для усіх конструктивних елементів групи. Після виконання операції усі конструктивні елементи групи матимуть однаковий переріз.
4	Коригування параметрів конструктивних елементів і груп конструктивних елементів	Параметри конструктивних елементів або груп конструктивних елементів можуть бути змінені в процесі експертизи і підбору.
5	Групи уніфікації	Групи уніфікації для перевірки перерізів створюються при призначенні конструктивних елементів. В групу уніфікації входять об'єкти, стержні яких мають однаковий тип жорсткості. Об'єкт може входити тільки до однієї групи уніфікації.
6	Розрахунок	Виконується перевірка несучої здатності конструктивних елементів і груп конструктивних елементів. Перевірка виконується для усіх перерізів елементів по кожному чиннику РСЗ. Визначається найбільше значення кожного чинника. Реалізований комплекс перевірок по міцності і

		стійкості відповідно до ДБН В.2.6-198:2014 з наступними виключеннями: - розтягнуті стержні не перевіряються на міцність, якщо їх експлуатація можлива після досягнення межі плинності; - не виконується перевірка по формулі (49) за умови забезпечення місцевої стійкості; - при визначенні коефіцієнта φ_0 прийнято, що навантаження рівномірно розподілене і прикладене до стислого поясу, не закріпленого в прольоті від втрати стійкості. Перевірки по ДБН В.2.6-198:2014 визначаються типом поперечного перерізу елементу і діючими навантаженнями. Стержні перевіряються по: - міцності при дії подовжньої сили N п. 5.1; - стійкості при стискуванні в площинах XOZ і XOY п. 5.3; - міцності при дії моменту M_y або M_z п., що вигинає, 5.12; - міцності при дії поперечної сили V_z або V_y пп. 5.12, 5.18; - міцності при спільній дії N, M_y і M_z пп. 5.24, 5.25; - стійкості в площині XOZ або XOY при позацентровим стискуванні п. 5.27; - стійкості з площини XOZ або XOY при позацентровим стискуванні пп. 5.30-5.32;
--	--	--

		- стійкості плоскої форми вигину при дії моменту M_y п. 5.15; - стійкості при стискуванні з ексцентриситетом п. 5.34; надмірним деформаціям розтягнутого волокна п. 5.28.
7	Відображення результатів	Результати перевірки несучої здатності відображуються для конструктивних елементів, і їх груп.
8	Звіт	За результатами перевірки формується звіт згідно з обраними об'єктами. Зміст звіту призначається за опціями програми.
9	Підбір перерізів елементів	Підбір перерізів елементів виконується для поодиноких прокатних профілів. Якщо елементи об'єднані в уніфіковану групу, то в результаті підбору вони матимуть однакові перерізи. Підбір виконується у сортаменті, прийнятим при призначенні перерізів елементів для вказаного виду профілю. За результатами підбору можна застосувати підібрані перерізи і перерахувати завдання.

Алгоритм створення розрахункової моделі приведений на рисунку 2.2.



Рисунок 2.2 Схема алгоритму створення розрахункової моделі

Алгоритм обрання проектного рішення представлений на рисунку 2.3.

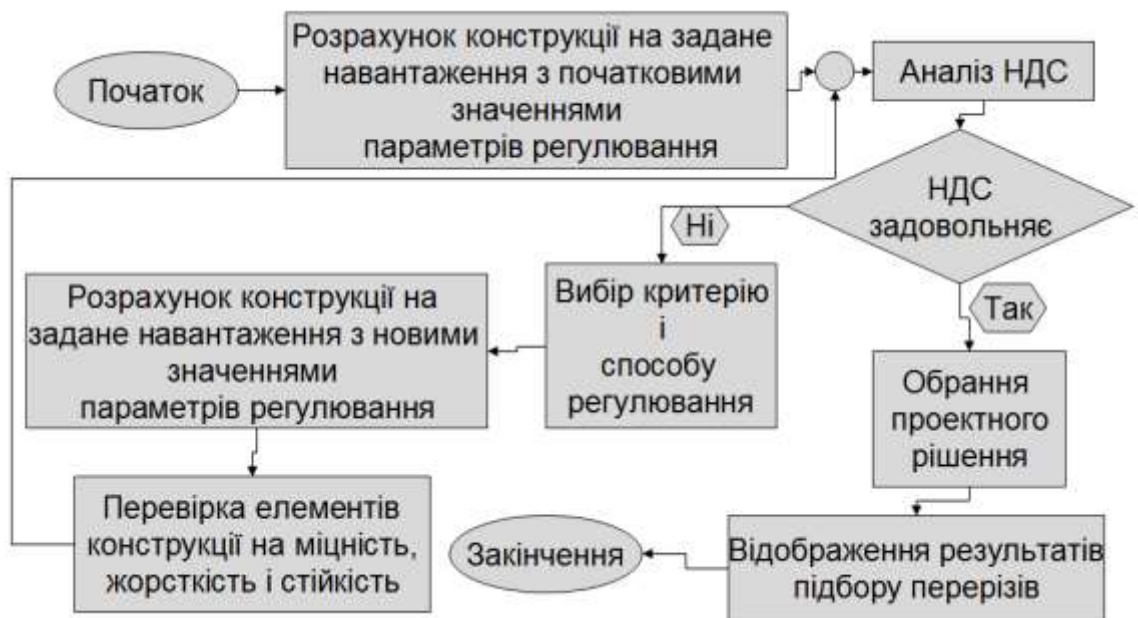


Рисунок 2.3 Схема алгоритму обрання проектного рішення.

Розділ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Вибір геометричної схеми рами каркасу

Представлені результати рішення задачі порівняння досліджуваних варіантів моделі для виявлення раціональних конструктивних рішень за критерієм матеріаломісткості.

3.1.1 Характеристика об'єкту

Об'єкт оптимізації - модель автосалону фірми "Skoda Auto", призначений для презентації автомобілів, загальний вигляд якого представлений на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1. Архітектурний вигляд об'єкта

Будівля автосалону - одноповерхова, прямокутна в плані з розмірами в осях 18,0х29, 92м.

Конструктивна схема - каркасна, трьохпролітна. Каркас - металевий.

Крок колон 6м.

					ДКД 19239 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Покриття автосалону є криволінійною поверхнею, утвореною конструкціями арочних плоских ферм з трикутними ґратами.

Покрівля - покрівельний профнастил по прогонах, розташованих з кроком 1,85м.

3.1.2 Створення скінчено - елементної схеми моделі

Даний об'єкт є спорудою з конструктивною схемою, що складається з великого числа елементів. Рівень відповідальності 1б.

При побудові моделі використовувались наступні можливості програми [5]:

- імпорт геометрії системи з програми "AutoCAD";
- прочитання даних з текстового файлу;
- режим складання.

Конструкція моделювалася по наявній проектній документації, виконаній ТОВ "ПРОМБЕЗПЕКА" м. Кіровоград.

При створенні моделі розрахункової схеми в SCAD виділені наступні групи елементів конструкції: рама, конструкції, що захищають.

В результаті в середовищі SCAD отримана модель, показана на рисунку 3.2.

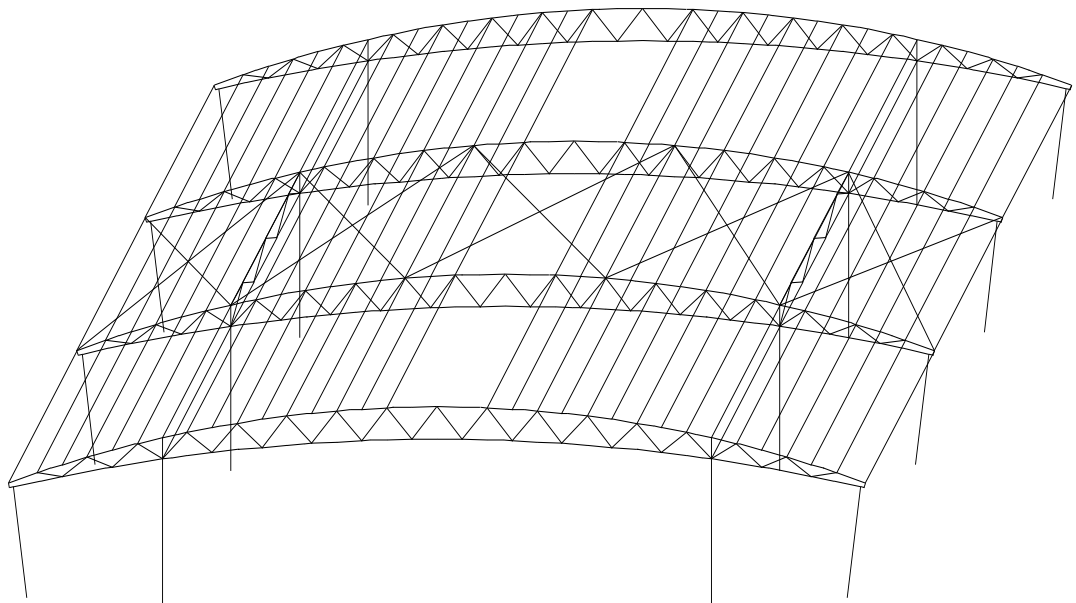


Рисунок 3.2 Модель розрахункової схеми об'єкта

3.1.3 Характеристика навантажень

Діючі навантаження представлені постійним - від ваги конструкції, що несе, а також постійним від ваги покрівлі, тимчасовим - сніговим і короткочасним - технологічним.

Вітрові, температурні і інші навантаження на цьому етапі не розглядалися.

Значення розподілених навантажень на середню арочну ферму представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Значення розподілених навантажень

Вид	Значення, $\frac{T}{M}$	Характеристика
Власна вага рами	Вираховується	постійна
Вага покрівлі	0,06	постійна
Корисна	0,1	короткочасна
Снігова	0,14	тимчасова

Власна вага конструкцій була задана автоматично за допомогою функції завдання власної ваги. Інші діючі навантаження були прикладені на відповідні вузли і елементи згідно зі схемою, показаною на рисунку 3.3.

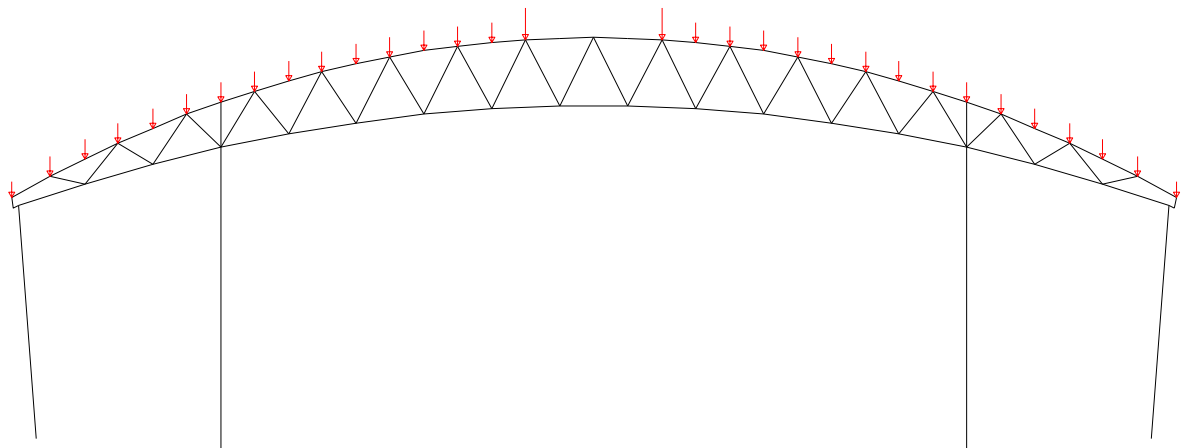


Рисунок 3.3 Схема прикладання навантажень

Цільовою функцією була умовна матеріаломісткість, відповідна власній вазі G моделі металевої конструкції за умови максимального значення коефіцієнта використання кожного елемента конструкції.

Значення цільової функції визначалося за допомогою постпроцесора SCAD "Перевірка несучої здатності сталевих перерізів".

Для спрощення завдання порівняння були прийняті наступні гіпотези:

- Усі елементи конструкції виконані із сталі з однаковими механічними властивостями.
 - Коефіцієнти розрахункової довжини усіх елементів конструкції
- Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования..**
- Прийняті для розглянутих моделей ферм типи решітки істотно не впливають на вигляд цільової функції

Жорсткості елементів конструкції вибиралися з сортаменту «Труби електрозварюванні прямошовні по ГОСТ 10704- 91».

Вирішувалося завдання пошуку раціональної схеми споруди при зміні:

1. Умов сполучення ригеля з колонами.
2. Форми крізного ригеля (ферми).
3. Жорсткості вузлів сполучення ферм.

Для усіх отриманих моделей були пораховані значення умовної матеріаломісткості.

На рисунку 3.4 представлені схеми конструкції "Ригель - балка" з жорстким (а) і шарнірним (б) кріпленням колон до ригеля і результати обчислень цільової функції.

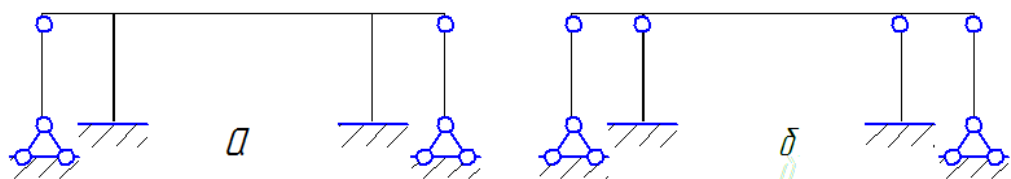


Рисунок 3.4 Схема конструкції "Ригель - балка"

а - жорстке з'єднання з колонами. Умовна вага $G = 3,6\text{т}$

б - шарнірне з'єднання з колонами. Умовна вага $G = 1,6\text{т}$

Перехід від жорсткого прикріплення ригеля до колони до шарнірного призводить до зменшення матеріаломісткості рами в 2,25 рази.

За результатами зіставлення значень цільової функції для наступних варіантів конструкції прийнято шарнірне сполучення колон з ригелем за схемою, показаною на рисунку 3.4б.

Вибір раціональної форми крізного ригеля визначався з наступних міркувань.

Контури поясів ферм визначають їх економічність. Найбільш економічною по витраті сталі є ферма, обкреслена по епюрі моментів відповідного балочного ригеля. Форма огинаючої епюри моментів повинна виключати появу снігових кишень і відповідати умовам водовідведення.

Епюра моменту, що вигинає, для схеми рами, показаної на рисунку 3.4б, представлена на рисунку 3.5.

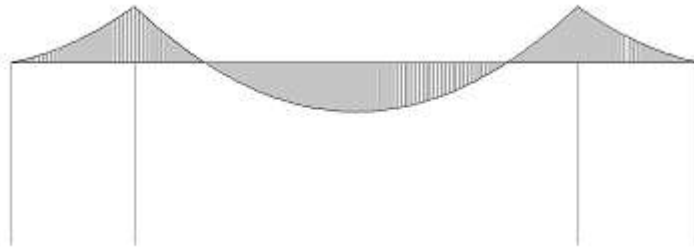


Рисунок 3.5 Епюра вигинаючих моментів балочної рами.

Принцип утворення контуру ферми показано на рисунку 3.6 .

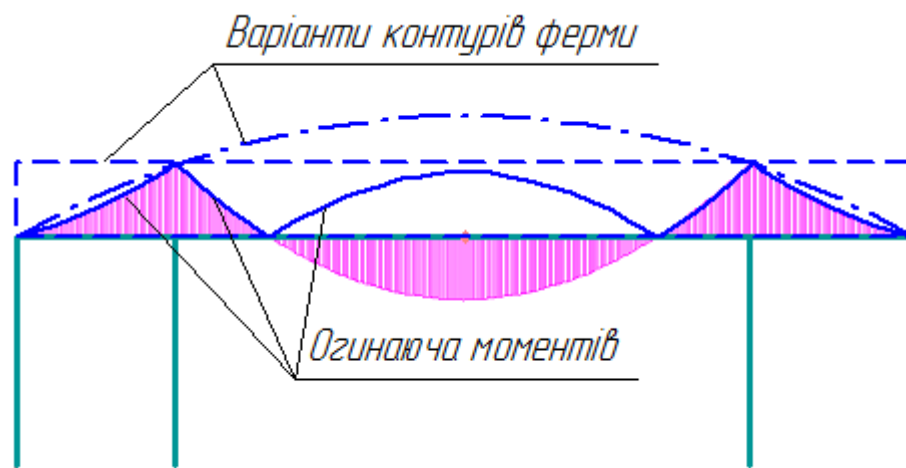


Рисунок 3.6. Побудова контуру ферми

Огинаюча епюри, побудованої для модуля значень згинаючого моменту, в першому наближенні вписується у ферму з паралельними поясами, а в наступному - у ферму серповидної форми, представлену прототипом конструкції (минувши проміжну - трапецеїдальну).

На рисунку 3.7 представлені схема і значення цільової функції G для ферм з паралельними поясами різної висоти H , з шарнірним і жорстким сполученням елементів.

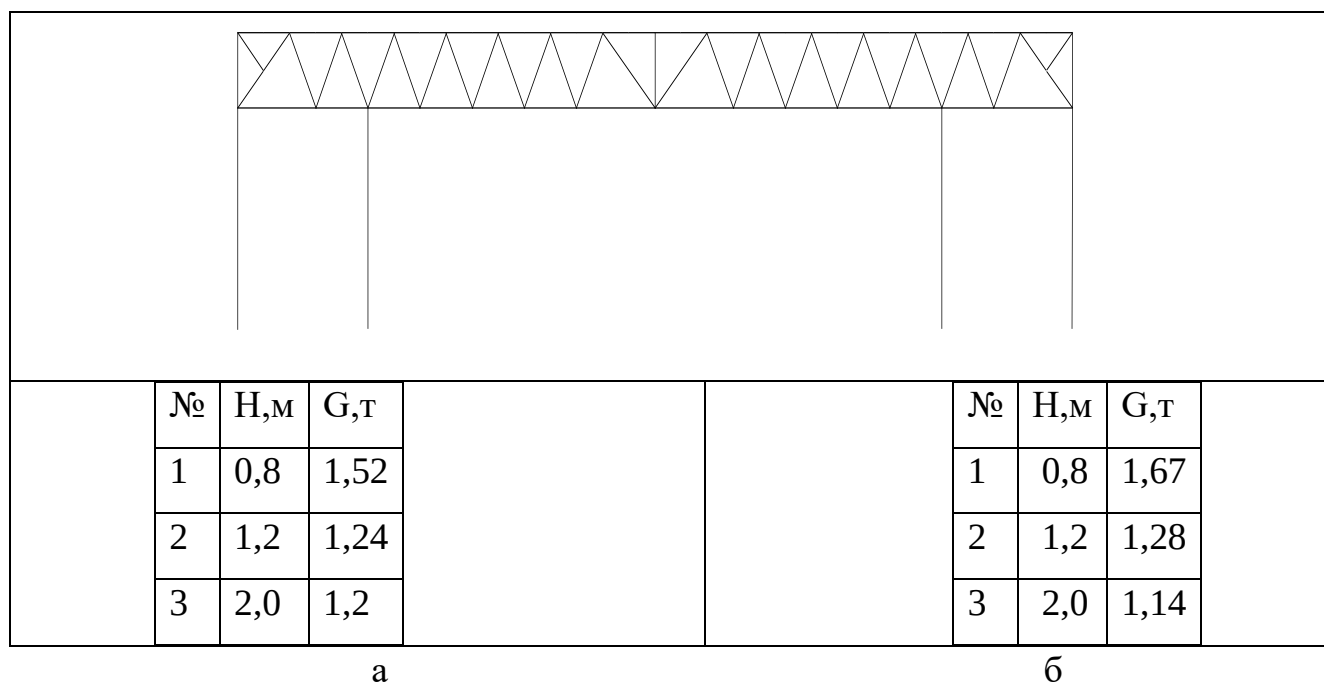


Рисунок 3.7. Схема і значення цільової функції для ферм з паралельними поясами.

а - шарнірне сполучення елементів ферми; б - жорстке сполучення елементів ферми .

З приведених на рисунку 3.7 даних маємо:

1. Із зміною висоти ферми умовна матеріаломісткість рами змінюється.
2. Існує висота ферми, відповідна мінімуму умовної матеріаломісткості рами.
3. Перехід від шарнірного з'єднання елементів ферми до жорсткого не призводить до істотного зменшення матеріаломісткості рами.

Заміна ригеля балочного типу фермою призводить до зменшення матеріаломісткості рами приблизно в 1,4 рази.

На рисунку 3.8 представлені схема і значення цільової функції G для ферм серповидного контуру, що мають незмінні розміри нижнього поясу і змінну кривизну верхнього поясу. Кривизна верхнього поясу характеризується відстанню H між верхніми точками дуг поясів.

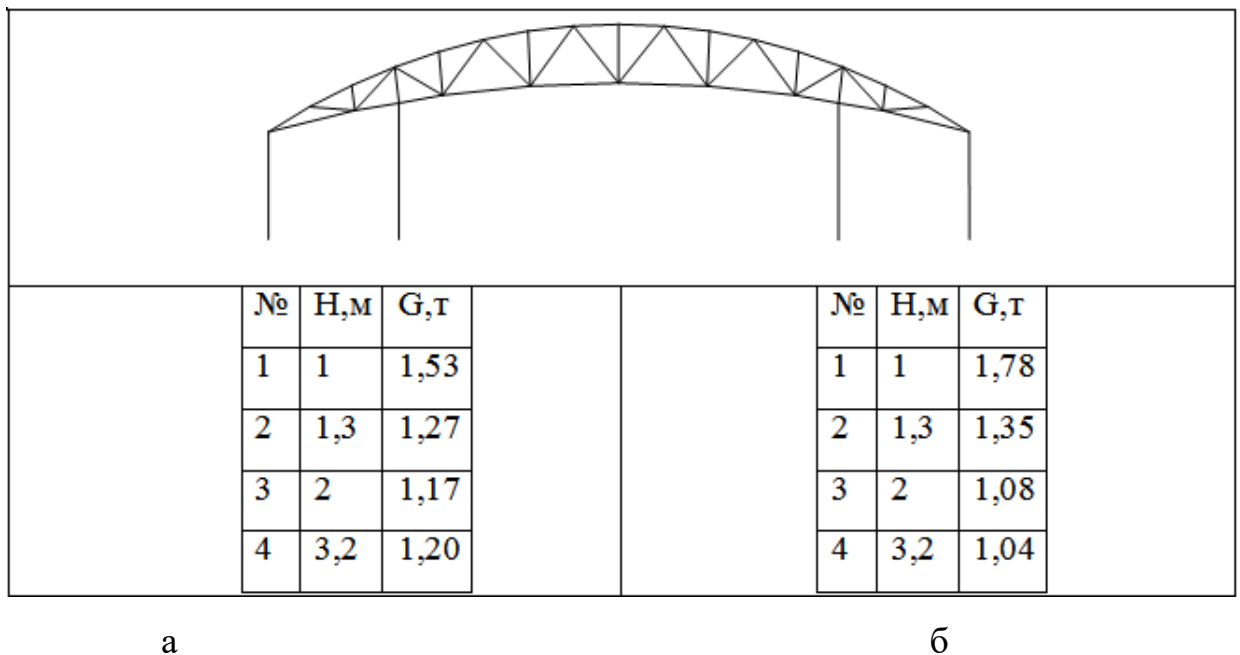


Рисунок 3.8 Схема і значення цільової функції для ферм з серповидним контуром.

а - шарнірне сполучення елементів ферми; б- жорстке сполучення елементів ферми .

З приведених на рисунку 3.8 даних слідує:

1. Зміна радіусу кривизни верхнього поясу серповидної ферми впливає на матеріаломісткість конструкції.
2. Існує значення радіусу кривизни верхнього поясу, при якому матеріаломісткість рами має мінімальне значення.
3. Перехід від шарнірного з'єднання елементів ферми до жорсткого призводить до деякого зменшення матеріаломісткості рами в області мінімуму цільової функції.

Узагальнення даних представлено на рисунку 3.9.

Ошибка! Раздел не указан.

Рисунок 3.9 Діаграма умовної матеріалоемності варіантів схеми рами

Висновок:

У області оптимуму цільової функції найменшу умовну матеріаломісткість для розглянутого об'єкту має рама з серповидною фермою певної конфігурації з шарнірним кріпленням стійок (колон) незалежно від жорсткості вузлів ферми.

Розділ 4

РОЗРОБКА МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЇ РАМИ КАРКАСУ

4.1. Загальні вимоги

Найбільш коштовною частиною рами каркасу даної конструкції є ригель.

Ригель конструкції прототипу виконано у вигляді ферми серповидного контуру з безшовних холодногнутих труб. Покриття: по кроквяних фермах з

кроком 2 м розташовані прогони прольотом $l = 6$ м, на які спирається сталевий профільований настил.

Кроквяні ферми з труб рекомендується використовувати в цивільних і промислових будівлях з прольотами до 30 м у поєднанні з легкими конструкціями, що захищають.

Застосування таких ферм обмежено конструктивними труднощами сполучення елементів з круглих труб, вища їх вартість в порівнянні з іншими типами профілів. При проектуванні безфасоночних з'єднань елементів ґрат з поясами в деяких випадках слід враховувати необхідність фігурного різання кінців елементів на майданчиках, оснащених спеціальним устаткуванням.

Тип ґрат має бути максимально простим, оскільки сполучення п'яти і більше стержнів істотно ускладнює конструкцію вузла. У зв'язку з цим найбільш прийнятними решітками є трикутна або трикутна з додатковими стойками. Небажано застосування яких-небудь шпренгельних елементів.

Контури поясів ферм визначають їх економічність. Найбільш економічною по витраті сталі є ферма, обкреслена по епюрі моментів.

Для нашого випадку розглядаються ферми з криволінійними, полігональними, трапецеїдальними чи з паралельними поясами.

Криволінійні пояси трудомісткі у виготовленні.

Вживаними є полігональні ферми, проте для легких ферм полігональний контур нераціональний, оскільки ускладнення вузлів не окупається економією сталі.

Ферми трапецеїдальні мають конструктивні переваги за рахунок спрощення вузлів.

Ферми з паралельними поясами мають рівні довжини елементів ґрат, однакову схему вузлів, повторюваність елементів і деталей, що сприяють індустріалізації їх виготовлення.

Гранично допустима висота ферми 3,85м по умові транспортування.

Найменша можлива висота ферми визначається допустимим прогином.

Згідно з архітектурним задумом прототипу знову розроблена конструкція має бути фермою серповидного контуру оптимальної висоти згідно з висновками розділу 3, трикутною решіткою зі стойками чи без них.

Крім того, жорсткий вузол спряження ферми з колоною має бути замінений на шарнірний.

4.2 Вимоги уніфікації та технологічні обмеження

1. Вузли сполучень елементів ферм з круглих труб слід проектувати безфасоночними, як менш трудомісткі і металоємні.
2. При проектуванні ферм слід віддавати перевагу схемам, при яких у вузлах ферм до поясів примикає не більше двох стержнів ґрат за інших рівних умов.
3. Діаметри поясних труб з метою зменшення гнучкості слід приймати найбільшими, а діаметри труб для елементів ґрат повинні знаходитися в межах $0,33 \cdot d$ до d діаметру поясних труб.
4. Товщина стінок труб також обмежується і не має бути менше 3 мм для поясів і опорних елементів ґрат і 2,5 мм - для інших елементів ґрат.
5. Крім того, відношення діаметру труби до товщини з метою забезпечення місцевої стійкості слід приймати не більше конкретних величин.

[Е.Ю.Давыдов/ Проектирование ферм из круглых к прямоугольных труб: Учеб. пос. по разделу «Расчет и конструирование стержневых конструкций с применением круглых и прямоугольных труб» курса «Металлические конструкции». - Ми: БГПА, 2000. -128 с.]

4.3 Результати оптимізації

Результати оптимізації перерізів (SCAD) варіантів ферм з різними рівнями уніфікації, різними умовами з'єднання з колонами і різними типами решітки за рисунками 4.1, 4.2 представлені в таблицях 4.1, 4.2, 4.3.

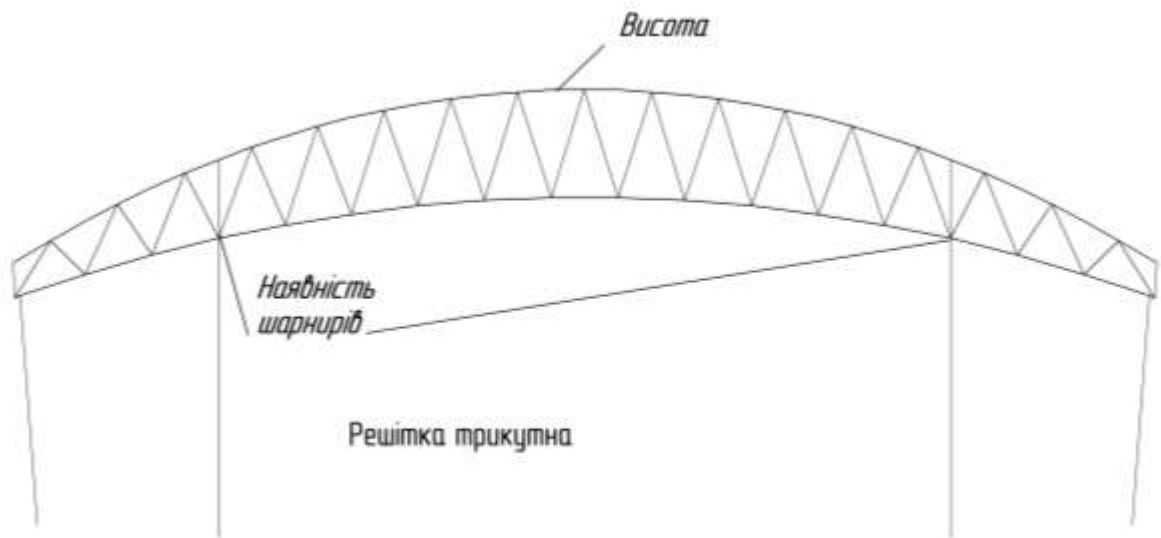


Рисунок 4.1 Схема рами з трикутною решіткою.

Варіанти №1, №2, №3. №4, №5, №6, №7

Таблиця 4.1.

Результати оптимізації перерізів ферм висотою 1,1м з трикутною решіткою

Варіант	З'єднання з колонами	Групи уніфікації	Кількість типів жорсткості у фермі (рівень уніфікації)	Вага, т
№1 Прототип	жорстке	1. Пояси 2. Стійки 3. Решітка	3	4034
№2	жорстке	1. Пояси 2. Стійки 3. Решітка	3	2,954
№3	жорстке	1. Пояс верхній 2. Пояс нижній 3. Стійки 4. Решітка	4	2,566
№4	шарнірне	1. Пояси 2. Стійки	3	2,358

		3. Решітка		
№5	шарнірне	1. Пояс верхній 2. Пояс нижній 3. Стійки 4. Решітка	4	2,313

З даних таблиці 4.1 можна зробити висновки:

1. Підбір жорсткостей прототипу при збереженні схеми рами і рівня уніфікації "3" дозволяє зменшити вагу рами в 1,37 рази.
2. Підбір жорсткостей прототипу при збереженні схеми рами і рівня уніфікації "4" дозволяє зменшити вагу рами в 1,57 рази.
3. Підбір жорсткостей прототипу при зміні схеми рами і збереженні рівня уніфікації "3" дозволяє зменшити вагу рами в 1,7 рази.
4. Підбір жорсткостей прототипу при зміні схеми рами і рівня уніфікації "4" дозволяє зменшити вагу рами в 1,74 рази.

Таблиця 4.2

Результати оптимізації перерізів ферм висотою 1,7м з трикутною
решіткою

Найменування	З'єднання з колонами	Групи уніфікації	Кількість типів жорсткості у фермі	Вага,т
№6	шарнірне	1. Пояси 2. Ел. спирання 3. Розкоси	3	2,3
№7	шарнірне	1. Пояс верхній 2. Пояс нижній 3. Ел. спирання 4. Розкоси	4	2,267

З даних таблиці 4.2 та порівнянні з даними таблиці 4.1 можна зробити висновки:

1. Уніфікація масштабованої конструкції з 3 до 4 не призводить до суттєвих змін маси рами.

2. Уніфікація конструкції з трикутними ґратами робить несуттєвим виграш в масі від зміни висоти ферми.



Рисунок 4.2 Схема рами з трикутною решіткою і стійками.

Варіанти №8, №9

Таблиця 4.3

Результати оптимізації перерізів ферм висотою 1,7м зі стійками

Найменування	З'єднання З колонами	Групи уніфікації	Кількість типів жорсткості у фермі	Вага, т
№8	шарнірне	1. Пояси 2. Стійки 3. Розкоси 4. Стійки	4	1,957
№9	шарнірне	1. Пояс верхній 2. Пояс нижній 3. Ел. спирання 4. Розкоси 5. Стійки	5	1,788

З даних таблиці 4.3 та порівнянні з даними таблиць 4.1 і 4.2 можна зробити висновки:

1. Уніфікація масштабованої конструкції з 3 до 4 з введенням стійок призводить до зменшення маси рами на 10%.
2. Уніфікація зводить нанівець перевагу масштабованої рами в порівнянні з прототипом при збереженні типу решітки (виграш 4%).
3. Істотний виграш виходить при переході до масштабованої рами з введенням стійок і збільшенням уніфікації до 5. (25%).

Об'єднавши отримані результати з вимогами п. 4.2 приймаємо до розробки варіант №4: ферма висотою 1,1м, з трикутною решіткою, шарнірним з'єднанням з колонами.

4.4 Обрані жорсткості елементів

Обрані жорсткості елементів конструкції рами з вказанням коефіцієнтів використання представлені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Елементи рами

Перевірка елементів сталевих конструкцій

Розрахунок по ДБН В.2.6-163:2010

Група К. Елемент №1

Розрахунковий опір сталі $R_y = 24500,0 \text{ Т/м}^2$

Коефіцієнт умов роботи -- 1,0

Гранична гнучкість -- 150,0

Коефіцієнт розрахункової довжини в площині

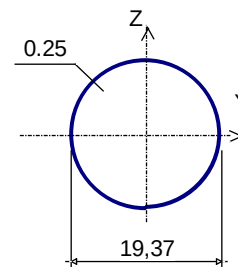
					ДКД 19239 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

X1,Y1 -- 0,5

Коефіцієнт розрахункової довжини в площині

X1,Z1 -- 0,5

Довжина елемента -- 4,7 м



Переріз

Труби

електрозварені прямошовні
по ГОСТ 10704-91 193.7x2.5

Результати розрахунку

Перевірен о по ДБН	Фактор	Коефіцієнт використання:
п.1.5.2.1	міцність при дії вигинаючого моменту M_y	0,11
п.1.5.2.1	міцність при дії поперечної сили Q_z	0
п.1.6.1.1	міцність при сумісній дії повздовжньої сили и вигинаючих моментів без врахування пластики	0,97
п.1.4.1.3	стійкість при стисненні в площині X1,O,Y1 (X1,O,U1)	0,9
п.1.4.1.3	стійкість при стисненні в площині X1,O,Y1 (X1,O,U1) X1,O,Z1 (X1,O,V1)	0,9
пп.1.6.2.9, 1.6.2.10	стійкість в площині X1,O,Y1 (X1,O,U1) дії моменту M_y при позацентровому стисненні	0,98
п.1.9.4.1	Гранична гнучкість в площині X1,O,Y1	0,23
п.1.9.4.1	Гранична гнучкість в площині X1,O,Z1	0,23

Коефіцієнт використання 0,98 - стійкість в площині дії моменту M_y при

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДКД 19239 ПЗ

Арк.

32

позацентровому стисненні

Група Ст. Елемент №3

Розрахунковий опір сталі $R_y = 24500,0 \text{ Т/м}^2$

Коефіцієнт умов роботи -- 1,0

Гранична гнучкість -- 150,0

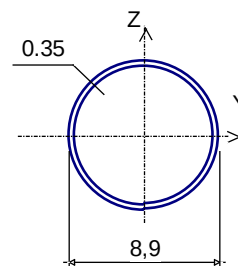
Коефіцієнт розрахункової довжини в площині

$X1, Y1$ -- 1,0

Коефіцієнт розрахункової довжини в площині

$X1, Z1$ -- 1,0

Довжина елемента -- 3,624 м



Переріз

Труби сталеві

безшовні

горячедеформовані,

ГОСТ 8732-78 89х3.5

Результати розрахунку

Перевірен	Фактор	Коефіцієнти
о по ДБН		використання :
п.1.5.2.1	міцність при дії вигинаючого моменту M_y	0
п.1.5.2.1	міцність при дії поперечної сили Q_z	0
п.1.6.1.1	міцність при сумісній дії повздовжньої сили и вигинаючих моментів без врахування пластики	0,07
п.1.9.4.1	Гранична гнучкість в площині $X1, O, Y1$	0,8
п.1.9.4.1	Гранична гнучкість в площині $X1, O, Z1$	0,8

Коефіцієнт використання 0,8 - Гранична гнучкість в площині $X1, O, Y1$

Група ВП. Елемент №18

Розрахунковий опір сталі $R_y = 24500,0 \text{ Т/м}^2$

					ДКД 19239 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Коефіцієнт умов роботи -- 1,0

Гранична гнучкість -- 150,0

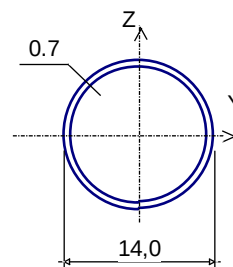
Коефіцієнт розрахункової довжини в площині

X1,Y1 -- 1,0

Коефіцієнт розрахункової довжини в площині

X1,Z1 -- 1,0

Довжина елемента -- 0,925 м



Переріз

Труби сталеві

безшовні

горячедеформовані, ,

ГОСТ 8732-78 140x7

Результати розрахунку

Пер	Фактор	Коефіцієнти використання :
евірено по ДБН		
п.1.5.2.1	міцність при дії вигинаючого моменту M_y	0,24
п.1.5.2.1	міцність при дії поперечної сили Q_z	0,04
п.1.6.1.1	прочность при совместном действии продольной силы и изгибающих моментов с учетом пластики	0,22
п.1.6.1.1	міцність при сумісній дії повздовжньої сили и вигинаючих моментів без врахування пластики	0,05
п.1.9.4.1	Гранична гнучкість в площині X1,O,Y1	0,13
п.1.9.4.1	Гранична гнучкість в площині X1,O,Z1	0,13

Коефіцієнт використання 0,24 - міцність при дії вигинаючого моменту M_y

Група ВП. Елемент №61

Розрахунковий опір сталі $R_y = 24500,0 \text{ Т/м}^2$

Коефіцієнт умов роботи -- 1,0

Гранична гнучкість -- 150,0

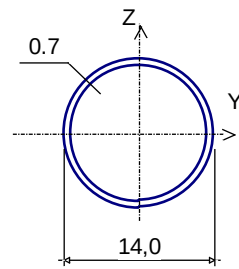
Коефіцієнт розрахункової довжини в площині

$X1, Y1$ -- 1,0

Коефіцієнт розрахункової довжини в площині

$X1, Z1$ -- 1,0

Довжина елемента -- 0,916 м



Переріз

Труби сталеві

безшовні

горячедеформовані, ,

ГОСТ 8732-78 140x7

Результати розрахунку

Перевіре но по ДБН	Фактор	Коефіцієнти використання :
п.1.5.2.1	міцність при дії вигинаючого моменту M_y	0,43
п.1.5.2.1	міцність при дії поперечної сили Q_z	0,04
п.1.6.1.1	прочность при совместном действии продольной силы и изгибающих моментов с учетом пластики	0,96
п.1.9.4.1	Гранична гнучкість в площині $X1, O, Y1$	0,13
п.1.9.4.1	Гранична гнучкість в площині $X1, O, Z1$	0,13

Коефіцієнт використання 0,96 - прочность при совместном действии продольной силы и изгибающих моментов с учетом пластики

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДКД 19239 ПЗ

Арк.

35

Група НП. Елемент №79

Розрахунковий опір сталі $R_y = 24500,0 \text{ Т/м}^2$

Коефіцієнт умов роботи -- 1,0

Гранична гнучкість -- 150,0

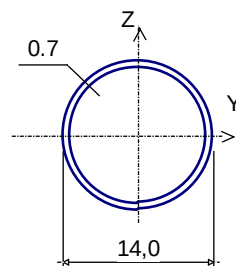
Коефіцієнт розрахункової довжини в площині

$X1, Y1$ -- 1,0

Коефіцієнт розрахункової довжини в площині

$X1, Z1$ -- 1,0

Довжина елемента -- 1,845 м



Переріз

Труби сталеві

безшовні

горячедеформовані, ,

ГОСТ 8732-78 140x7

Результати розрахунку

Перевірено по ДБН	Фактор	Коефіцієнти використання :
п.1.5.2.1	міцність при дії вигинаючого моменту M_y	0,28
п.1.5.2.1	міцність при дії поперечної сили Q_z	0,01
п.1.6.1.1	міцність при сумісній дії поздовжньої сили и вигинаючих моментів без врахування пластики	0,87
п.1.4.1.3	стійкість при стисненні в площині $X1, O, Y1$ ($X1, O, U1$)	0,62
п.1.4.1.3	стійкість при стисненні в площині $X1, O, Y1$ ($X1, O, U1$) $X1, O, Z1$ ($X1, O, V1$)	0,62
пп.1.6.2.9, 1.6.2.10	стійкість в площині $X1, O, Y1$ ($X1, O, U1$) дії моменту M_y при позacentровому стисненні	0,83
п.1.9.4.1	Гранична гнучкість в	0,26

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДКД 19239 ПЗ

Арк.

36

площині X1,O,Y1

п.1.9.4.1

Гранична гнучкість

в

0,26

площині X1,O,Z1

Коефіцієнт використання 0,87 - міцність при сумісній дії повздовжньої сили и вигинаючих моментів без врахування пластики

Група НП. Елемент №89

Розрахунковий опір сталі $R_y = 24500,0 \text{ Т/м}^2$

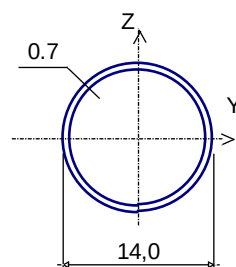
Коефіцієнт умов роботи -- 1,0

Гранична гнучкість -- 150,0

Коефіцієнт розрахункової довжини в площині X1,Y1 -- 1,0

Коефіцієнт розрахункової довжини в площині X1,Z1 -- 1,0

Довжина елемента -- 1,823 м



Переріз

Труби сталеві

безшовні

горячедеформовані, ,

ГОСТ 8732-78 140x7

Результати розрахунку

Перевірено	Фактор	Коефіцієнти використання :
по ДБН		
п.1.5.2.1	міцність при дії вигинаючого моменту M_y	0,05
п.1.5.2.1	міцність при дії поперечної сили Q_z	0
п.1.6.1.1	прочность при совместном действии продольной силы и изгибающих моментов с учетом пластики	0,09

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДКД 19239 ПЗ

Арк.

37

п.1.6.1.1	міцність при сумісній дії повздовжньої сили и вигинаючих моментів без врахування пластики	0,04
п.1.9.4.1	Гранична гнучкість в площині X1,O,Y1	0,26
п.1.9.4.1	Гранична гнучкість в площині X1,O,Z1	0,26

Коефіцієнт використання 0,26 - Гранична гнучкість в площині X1,O,Y1

Група Р. Елемент №19

Розрахунковий опір сталі $R_y = 24500,0 \text{ Т/м}^2$

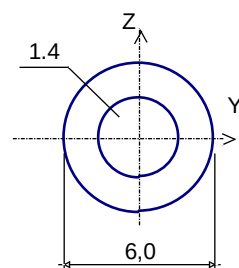
Коефіцієнт умов роботи -- 1,0

Гранична гнучкість -- 150,0

Коефіцієнт розрахункової довжини в площині
X1,Y1 -- 1,0

Коефіцієнт розрахункової довжини в площині
X1,Z1 -- 1,0

Довжина елемента -- 1,25 м



Переріз

Труби по ГОСТ
10704-91 (скорочені)
D60x14

Результати розрахунку

Перевірен	Фактор	Коефіцієнти використання :
о по ДБН		
п.1.5.2.1	міцність при дії вигинаючого моменту M_y	0,1
п.1.5.2.1	міцність при дії поперечної сили Q_z	0
п.1.6.1.1	міцність при сумісній дії	0,8

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДКД 19239 ПЗ

Арк.

38

	повздовжньої сили и вигинаючих моментів без врахування пластики	
п.1.4.1.3	стійкість при стисненні в площині X_1, O, Y_1 (X_1, O, U_1)	0,87
п.1.4.1.3	стійкість при стисненні в площині X_1, O, Y_1 (X_1, O, U_1) X_1, O, Z_1 (X_1, O, V_1)	0,87
пп.1.6.2.9, 1.6.2.10	стійкість в площині X_1, O, Y_1 (X_1, O, U_1) дії моменту M_y при позацентровому стисненні	0,99
п.1.9.4.1	Гранична гнучкість в площині X_1, O, Y_1	0,49
п.1.9.4.1	Гранична гнучкість в площині X_1, O, Z_1	0,49

Коефіцієнт використання 0,99 - стійкість в площині X_1, O, Y_1 (X_1, O, U_1) дії моменту M_y при позацентровому стисненні

Група Р. Елемент №53

Розрахунковий опір сталі $R_y = 24500,0 \text{ Т/м}^2$

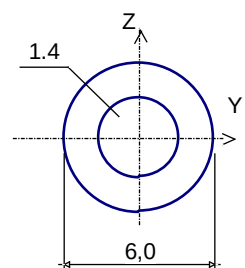
Коефіцієнт умов роботи -- 1,0

Гранична гнучкість -- 150,0

Коефіцієнт розрахункової довжини в площині X_1, Y_1 -- 1,0

Коефіцієнт розрахункової довжини в площині X_1, Z_1 -- 1,0

Довжина елемента -- 0,942 м



Переріз

Труби по ГОСТ
10704-91 (скорочені)
D60x14

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДКД 19239 ПЗ

Арк.

39

Результати розрахунку

Перевірено по ДБН	Фактор	Коефіцієнти використання :
п.1.5.2.1	міцність при дії вигинаючого моменту M_y	0,09
п.1.5.2.1	міцність при дії поперечної сили Q_z	0
п.1.6.1.1	міцність при сумісній дії повздовжньої сили и вигинаючих моментів без врахування пластики	0,28
п.1.4.1.3	стійкість при стисненні в площині X_1, O, Y_1 (X_1, O, U_1)	0,22
п.1.4.1.3	стійкість при стисненні в площині X_1, O, Y_1 (X_1, O, U_1) X_1, O, Z_1 (X_1, O, V_1)	0,22
пп.1.6.2.9, 1.6.2.10	стійкість в площині X_1, O, Y_1 (X_1, O, U_1) дії моменту M_y при позацентровому стисненні	0,3
п.1.9.4.1	Гранична гнучкість в площині X_1, O, Y_1	0,37
п.1.9.4.1	Гранична гнучкість в площині X_1, O, Z_1	0,37

Коефіцієнт використання 0,37 - Гранична гнучкість в площині X_1, O, Y_1

Група Заглушки. Елемент №6

Розрахунковий опір сталі $R_y = 24500,0 \text{ Т/м}^2$

Коефіцієнт умов роботи -- 1,0

Гранична гнучкість -- 150,0

Коефіцієнт розрахункової довжини в площині

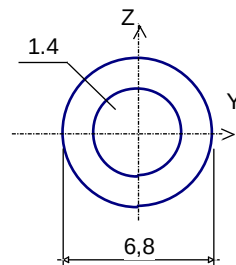
					ДКД 19239 ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

X1,Y1 -- 1,0

Коефіцієнт розрахункової довжини в площині

X1,Z1 -- 1,0

Довжина елемента -- 0,167 м



Переріз

Труби сталеві

безшовні

горячедеформовані, ,

ГОСТ 8732-78 68х14

Результати розрахунку

Перевірено	Фактор	Коефіцієнти
по ДБН		використання :
п.1.5.2.1	міцність при дії вигинаючого моменту M_y	0,97
п.1.5.2.1	міцність при дії поперечної сили Q_z	0,35
п.1.6.1.1	міцність при сумісній дії повздовжньої сили и вигинаючих моментів без врахування пластики	0,98
п.1.9.4.1	Гранична гнучкість в площині X1,O,Y1	0,06
п.1.9.4.1	Гранична гнучкість в площині X1,O,Z1	0,06

Коефіцієнт використання 0,98 - міцність при сумісній дії повздовжньої сили и вигинаючих моментів без врахування пластики

Група Опорні . Елемент №58

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДКД 19239 ПЗ

Арк.

41

Розрахунковий опір сталі $R_y = 24500,0 \text{ Т/м}^2$

Коефіцієнт умов роботи -- 1,0

Гранична гнучкість -- 150,0

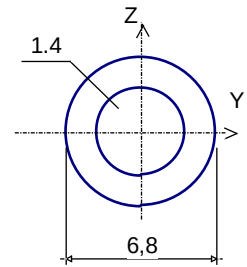
Коефіцієнт розрахункової довжини в площині

$X1, Y1$ -- 1,0

Коефіцієнт розрахункової довжини в площині

$X1, Z1$ -- 1,0

Довжина елемента -- 0,694 м



Переріз

Труби сталеві

безшовні

горячедеформовані, ,

ГОСТ 8732-78 68х14

Результати розрахунку

Перевірено	Фактор	Коефіцієнти використання :
по ДБН		
п.1.5.2.1	міцність при дії вигинаючого моменту M_y	0,2
п.1.5.2.1	міцність при дії поперечної сили Q_z	0,02
п.1.6.1.1	міцність при сумісній дії поздовжньої сили и вигинаючих моментів без врахування пластики	0,26
п.1.4.1.3	стійкість при стисненні в площині $X1, O, Y1$ ($X1, O, U1$)	0,07
п.1.4.1.3	стійкість при стисненні в площині $X1, O, Y1$ ($X1, O, U1$) $X1, O, Z1$ ($X1, O, V1$)	0,07
пп.1.6.2.9, 1.6.2.10	стійкість в площині $X1, O, Y1$ ($X1, O, U1$) дії моменту M_y при позacentровому стисненні	0,2
п.1.9.4.1	Гранична гнучкість в	0,23

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДКД 19239 ПЗ

Арк.

42

площині X_1, O, Y_1
 п.1.9.4.1 Гранична гнучкість в 0,23
 площині X_1, O, Z_1

Коефіцієнт використання 0,26 - міцність при сумісній дії повздовжньої сили і вигинаючих моментів без врахування пластики пластик

Розділ 5

РОЗРАХУНКИ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЇ РАМИ КАРКАСУ

					ДКД 19239 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Епюри внутрішніх зусиль представлені на рисунках 5.1, 5.2, 5.3.

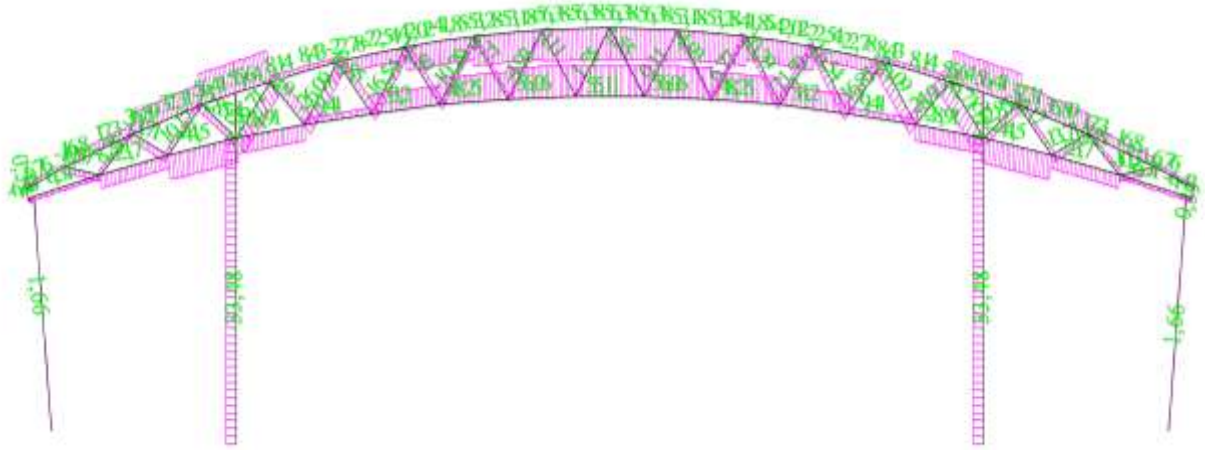


Рисунок 5.2 Епюри згинаючих моментів

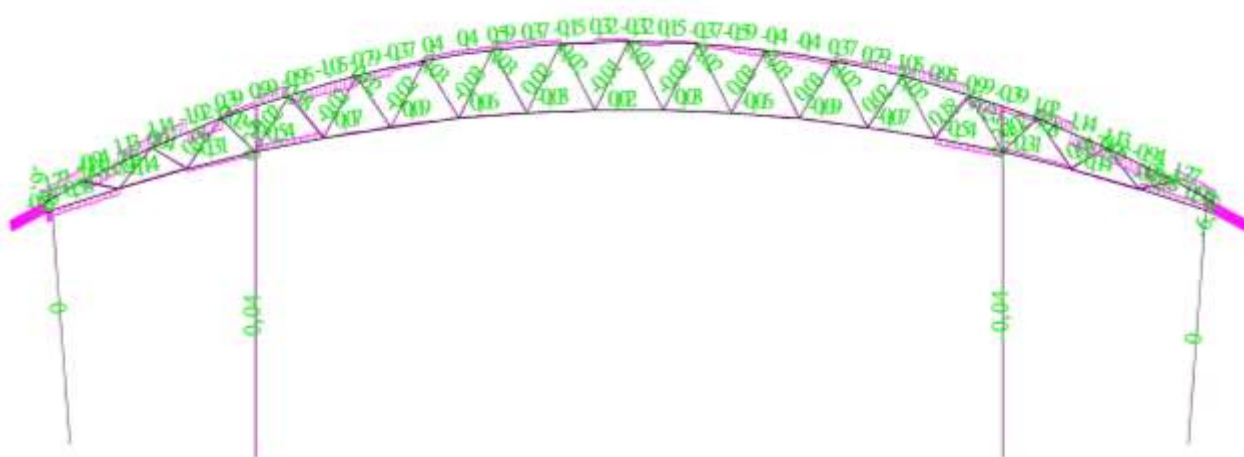


Рисунок 5.3 Епюри поперечних сил

5.2 Перевірочний розрахунок рами з врахуванням вітрового навантаження.

Вітрове навантаження на конструкцію розраховуємо за допомогою сателиту «ВЕСТ».

Дані розрахунку представлені в таблиці 5.1

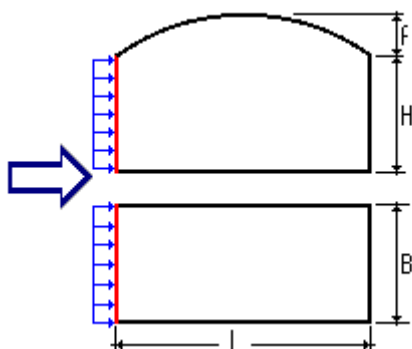
Таблиця 5.1

Розрахунок вітрового навантаження

ВІТЕР

Розрахунок виконан по нормам проектування "ДБН В.1.2-2:2006 с изменением №1"

Вихідні дані		
Характеристичне вітрового тиску	значення	0,41 кПа
Тип місцевості		II - сільська місцевість з огорожами
Тип споруди		Споруди зі сводами
Висота розташування будівельного об'єкту над рівнем моря		0,3 км



Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

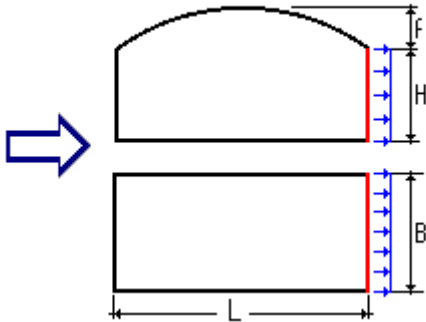
ДКД 19239 ПЗ

Арк.

45

Параметри		
Поверхність		Левая стена
Шаг сканування		1 м
Коефіцієнт надійності по граничному розрахунковому значенню γ_{fm}		1,1
Коефіцієнт надійності по експлуатаційному розрахунковому значенню γ_{fe}		1
H	4	м
B	18	м
f	3	м
L	30	м

Висота (м)	Експлуатаційне значення (кПа)	Граничне значення (кПа)
0	0,394	0,433
1	0,394	0,433
2	0,394	0,433
3	0,394	0,433
4	0,394	0,433



Параметри		
Поверхність	Правая стена	
Шаг сканування	1 м	
Коефіцієнт надійності по граничному розрахунковому значенню γ_{fm}	1,1	
Коефіцієнт надійності по експлуатаційному розрахунковому значенню γ_{fe}	1	

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
-----	------	----------	--------	------

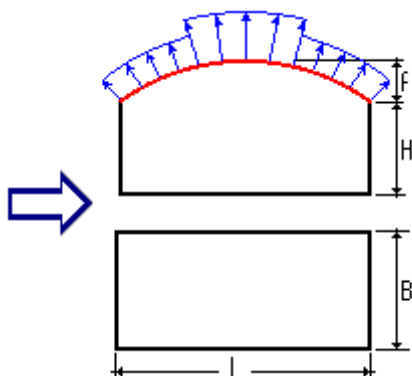
ДКД 19239 ПЗ

Арк.

46

Н	4	М
В	18	М
f	3	М
L	30	М

Высота (м)	Експлуатаційне значення (кПа)	Граничне значення (кПа)
0	-0,197	-0,216
1	-0,197	-0,216
2	-0,197	-0,216
3	-0,197	-0,216
4	-0,197	-0,216



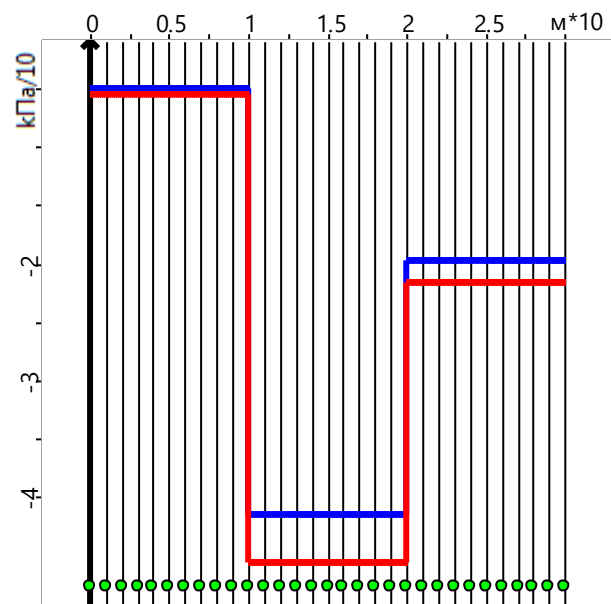
Параметри		
Поверхність	Кровля	
Шаг сканування	1 м	
Коефіцієнт надійності по граничному розрахунковому значенню γ_{fm}	1,1	
Коефіцієнт надійності по експлуатаційному розрахунковому значенню γ_{fe}	1	
Н	4	М
В	18	М
f	3	М
L	30	М

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
-----	------	----------	--------	------

ДКД 19239 ПЗ

Арк.

47



Відстань від краю кровлі (м)	Експлуатаційне значення (кПа)	Граничне значення (кПа)
0	-0,049	-0,054
1	-0,049	-0,054
2	-0,049	-0,054
3	-0,049	-0,054
4	-0,049	-0,054
5	-0,049	-0,054
6	-0,049	-0,054
7	-0,049	-0,054
8	-0,049	-0,054
9	-0,049	-0,054
10	-0,171	-0,188
11	-0,415	-0,457
12	-0,415	-0,457
13	-0,415	-0,457
14	-0,415	-0,457
15	-0,415	-0,457
16	-0,415	-0,457
17	-0,415	-0,457
18	-0,415	-0,457
19	-0,415	-0,457
20	-0,27	-0,297
21	-0,197	-0,216
22	-0,197	-0,216
23	-0,197	-0,216

Відстань від краю кровлі (м)	Експлуатаційне значення (кПа)	Граничне значення (кПа)
24	-0,197	-0,216
25	-0,197	-0,216
26	-0,197	-0,216
27	-0,197	-0,216
28	-0,197	-0,216
29	-0,197	-0,216
30	-0,197	-0,216

5.3 НДС рами

5.3.1 Результати розрахунку рами за РСУ від власної ваги, ваги покрівлі, корисної ваги, снігового навантаження по усій покрівлі та вітру представлені на рисунку 5.4

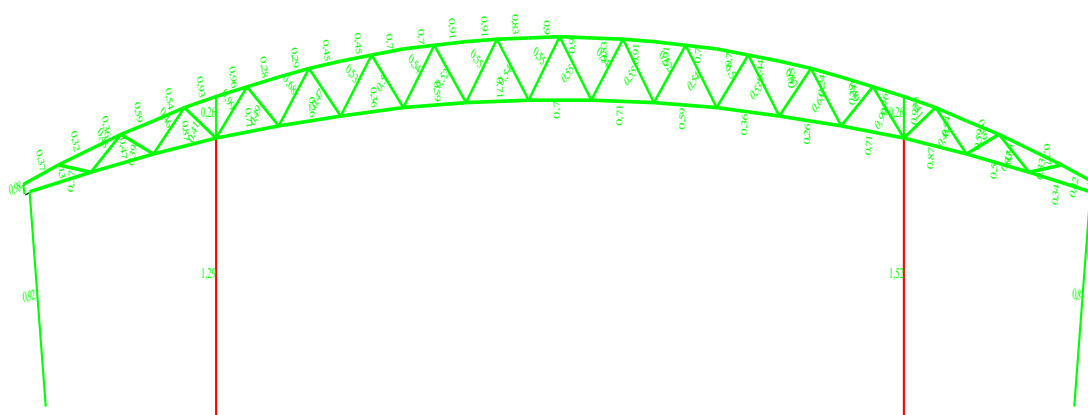


Рисунок 5.4 Характеристика НДС рами з врахуванням вітрового навантаження.

Колони перевантажені.

Перерахунок за допомогою постпроцесора дав результат, вказаний в таблиці 5.2

Таблиця 5.2

Перевірка елементів сталеві конструкції

ДКД 19239 ПЗ					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	49

Расчет по ДБН В.2.6-163:2010

Група К. Елемент №2

Розрахунковий опір сталі $R_y = 24500,0 \text{ Т/м}^2$

Коефіцієнт умов роботи -- 1,0

Гранична гнучкість -- 150,0

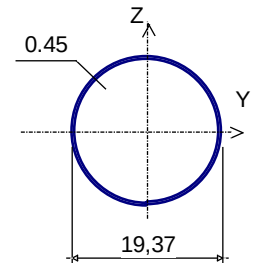
Коефіцієнт розрахункової довжини в площині

$X1, Y1$ -- 0,5

Коефіцієнт розрахункової довжини в площині

$X1, Z1$ -- 0,5

Довжина елемента -- 4,7 м



Переріз

Труби

електрозварені

прямошовні по ГОСТ

10704-91 193.7x4.5

Результати розрахунку

Перевірен	Фактор	Коефіцієнти
о по ДБН		використання :
п.1.5.2.1	міцність при дії вигинаючого моменту M_y	0,52
п.1.5.2.1	міцність при дії поперечної сили Q_z	0,02
п.1.6.1.1	міцність при сумісній дії повздовжньої сили и вигинаючих моментів без врахування пластики	0,97
п.1.4.1.3	стійкість при стисненні в площині $X1, O, Y1$ ($X1, O, U1$)	0,51
п.1.4.1.3	стійкість при стисненні в площині $X1, O, Y1$ ($X1, O, U1$) $X1, O, Z1$ ($X1, O, V1$)	0,51

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДКД 19239 ПЗ

Арк.

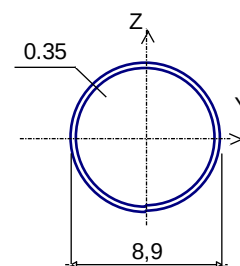
50

пп.1.6.2.9, 1.6.2.10	стійкість в площині $X1,O,Y1$ ($X1,O,U1$) дії моменту M_y при позацентровому стисненні	0,82
п.1.9.4.1	Гранична гнучкість в площині $X1,O,Y1$	0,23
п.1.9.4.1	Гранична гнучкість в площині $X1,O,Z1$	0,23

Коефіцієнт використання 0,97 - міцність при сумісній дії повздовжньої сили и вигинаючих моментів без врахування пластики

Група Ст. Елемент №3

Розрахунковий опір сталі $R_y = 24500,0 \text{ Т/м}^2$
Коефіцієнт умов роботи -- 1,0
Гранична гнучкість -- 150,0
Коефіцієнт розрахункової довжини в площині
 $X1,Y1$ -- 1,0
Коефіцієнт розрахункової довжини в площині
 $X1,Z1$ -- 1,0
Довжина елемента -- 3,624 м



Переріз

Труби сталеві
безшовні
горячедеформовані,
ГОСТ 8732-78 89х3.5

Результати розрахунку

Перевірен	Фактор	Коефіцієнти
о по ДБН		використання :
п.1.5.2.1	міцність при дії вигинаючого моменту M_y	0,89
п.1.5.2.1	міцність при дії поперечної сили Q_z	0,07

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДКД 19239 ПЗ

Арк.

51

п.1.6.1.1	міцність при сумісній дії повздовжньої сили и вигинаючих моментів без врахування пластики	0,92
п.1.4.1.3	стійкість при стисненні в площині X1,O,Y1 (X1,O,U1)	0,07
п.1.4.1.3	стійкість при стисненні в площині X1,O,Y1 (X1,O,U1) X1,O,Z1 (X1,O,V1)	0,07
пп.1.6.2.9, 1.6.2.10	стійкість в площині X1,O,Y1 (X1,O,U1) дії моменту M_y при позацентровому стисненні	0,49
п.1.9.4.1	Гранична гнучкість в площині X1,O,Y1	0,8
п.1.9.4.1	Гранична гнучкість в площині X1,O,Z1	0,8

Коефіцієнт використання 0,92 - міцність при сумісній дії повздовжньої сили и вигинаючих моментів без врахування пластики

5.3.2 Результати розрахунку рами за РСУ від власної ваги, ваги покрівлі, корисної ваги, снігового навантаження по половині покрівлі ліворуч та вітру представлені на рисунку 5.5. Прийняті жорсткості елементів відповідають вимогам першого граничного стану.

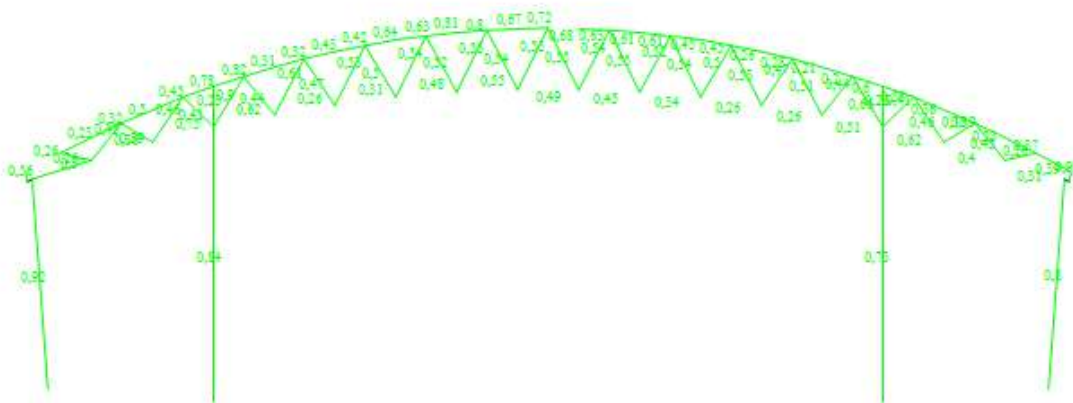


Рисунок 5.5 Характеристика НДС рами з врахуванням вітрового навантаження, снігова кишень ліворуч.

5.3.3 Результати розрахунку рами за РСУ від власної ваги, ваги покрівлі, корисної ваги, снігового навантаження по половині покрівлі праворуч та вітру представлені на рисунку 5.6. Прийняті жорсткості колон не відповідають вимогам першого граничного стану.

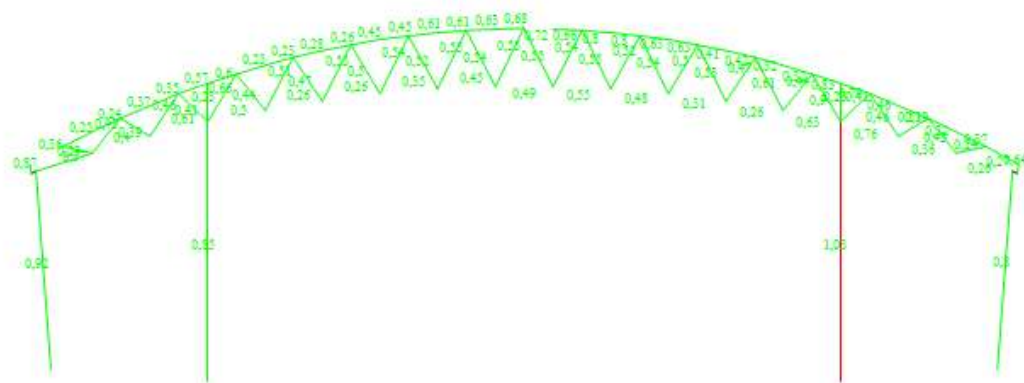


Рисунок 5.6 Характеристика НДС рами з врахуванням вітрового навантаження, снігова кишень праворуч.

Колона перевантажена.

Перерахунок за допомогою постпроцесора дав результат, вказаний в таблиці 5.3

Таблиця 5.3.

Перевірка елементів сталевих конструкцій

Розрахунок по ДБН В.2.6-163:2010

Група К. Елемент №2

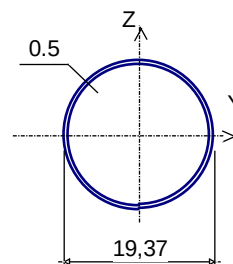
Розрахунковий опір сталі $R_y = 24500,0 \text{ Т/м}^2$

Коефіцієнт умов роботи -- 1,0

Гранична гнучкість -- 150,0

ДКД 19239 ПЗ					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	53

Коефіцієнт розрахункової довжини в площині
 $X1, Y1$ -- 0,5
 Коефіцієнт розрахункової довжини в площині
 $X1, Z1$ -- 0,5
 Довжина елемента -- 4,7 м



Переріз

Труби

електросварные
 прямошовные по ГОСТ
 10704-91 193.7x5

Результати розрахунку

Перевірено по ДБН	Фактор	Коефіцієнти використання :
п.1.5.2.1	міцність при дії вигинаючого моменту M_y	0,62
п.1.5.2.1	міцність при дії поперечної сили Q_z	0,02
п.1.6.1.1	міцність при сумісній дії повздовжньої сили и вигинаючих моментів без врахування пластики	1,0
п.1.4.1.3	стійкість при стисненні в площині $X1, O, Y1$ ($X1, O, U1$)	0,42
п.1.4.1.3	стійкість при стисненні в площині $X1, O, Y1$ ($X1, O, U1$) $X1, O, Z1$ ($X1, O, V1$)	0,42
пп.1.6.2.9, 1.6.2.10	стійкість в площині $X1, O, Y1$ ($X1, O, U1$) дії моменту M_y при позацентровому стисненні	0,81
п.1.9.4.1	Гранична гнучкість в площині $X1, O, Y1$	0,23

п.1.9.4.1

Гранична гнучкість в
площині X1,O,Z1

0,23

Коефіцієнт використання 1,0 - міцність при сумісній дії повздовжньої сили и вигинаючих моментів без врахування пластики

За результатами перевірконого розрахунку прийняті жорсткості елементів рами, які вказані в таблиці 5.4, порівняно з жорсткостями елементів прототипу (таблиця 5.5):

Таблиця 5.4

Прийняті перерізи елементів рами. Матеріал сталь С245.

№	Група уніфікації	Переріз	Вага на раму, т
1	Колона	Труби електросварные прямошовные по ГОСТ 10704-91 193.7x5	0,32
2	Стійка бокова	Труби сталеві безшовні горячедеформовані, , ГОСТ 8732-78 89x3.5	0,095
3	Пояси	Труби сталеві безшовні горячедеформовані, , ГОСТ 8732-78 140x7	1,46
4	Решітка	Труби по ГОСТ 10704-91 (скорочені) D60x14	0,48

Таблиця 5.5 Перерізи елементів рами прототипу. Матеріал сталь С245.

№	Група уніфікації	Переріз	Вага на раму, т
---	---------------------	---------	-----------------------

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДКД 19239 ПЗ

Арк.

55

1	Колона	Труби электросварные прямошовные по ГОСТ 10704-91 325x8	0,86
2	Стійка бокова	Труби сталеві безшовні горячедеформовані, ГОСТ 8732-78 127x5	0,19
3	Пояси	Труби сталеві безшовні горячедеформовані, ГОСТ 8732-78 159x10	2,328
4	Решітка	Труби по ГОСТ 10704-91 (скорочені) D95x7	1,705

5.4 Перевірка на жорсткість

Схема деформації рами під дією комбінацій навантажень представлена на рисунку 5.7

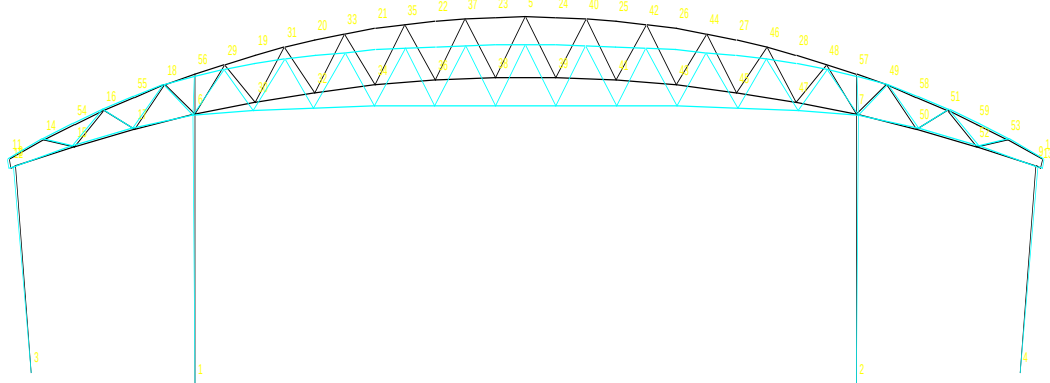


Рисунок 5.7 Схема деформації рами

Відносний прогин рами 0,004 для прольоту 20м, що не більше граничного значення 0,004 (Таблиця 5.5).

Таблиця 5.6

Визначення деформації ригеля

Координати и в'язі

Одиниці вимірювань: м.

Параметри виборки:

Список вузлів/Елементів: 5

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДКД 19239 ПЗ

Арк.

56

Умовна металоємність

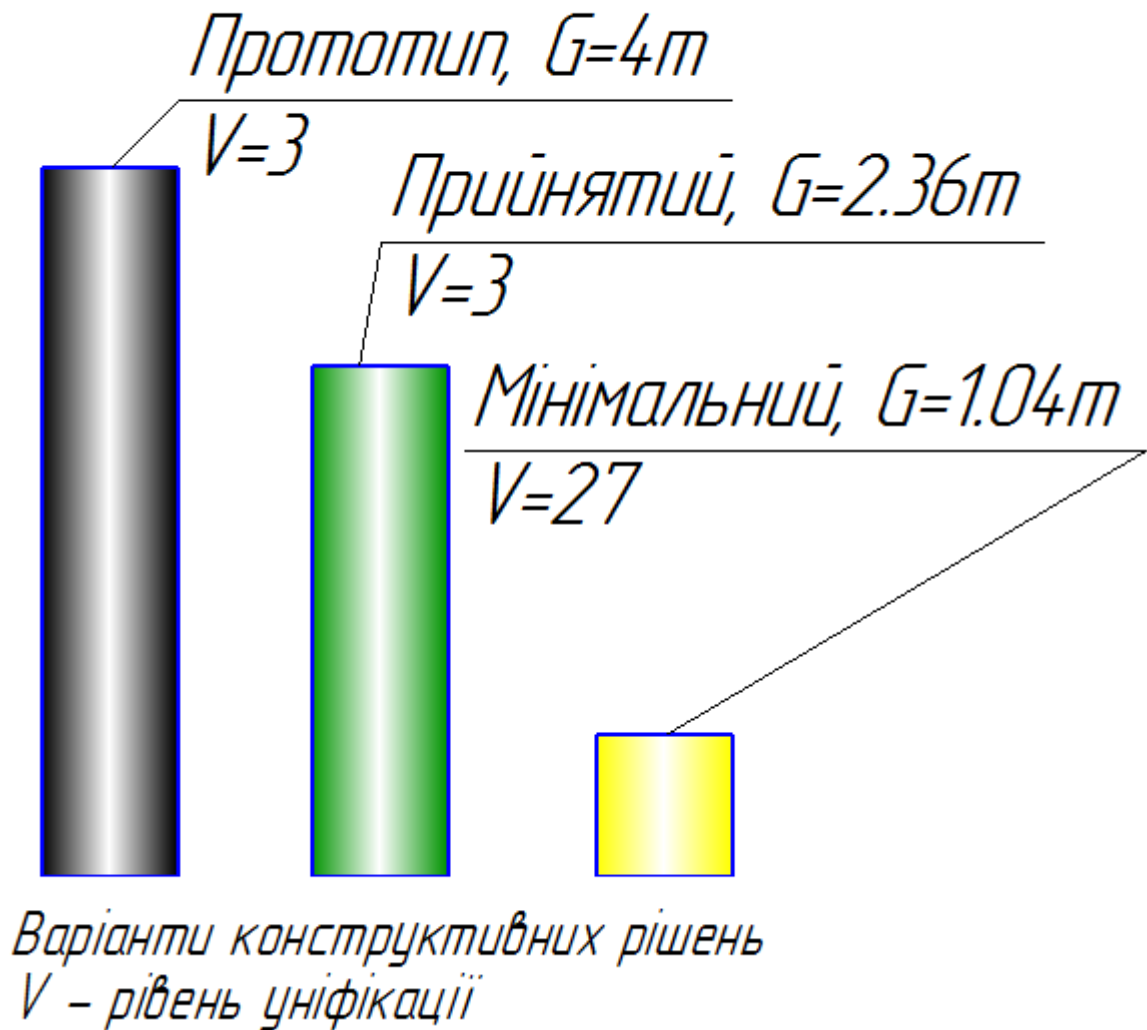


Рисунок 5.8. Діаграма порівняння умовної металоємності варіантів конструктивних рішень рами

Технологічні обмеження істотно впливають на металоємність конструкції.

ВИСНОВКИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Розроблений алгоритм дослідження варіантів оптимізації комбінованої арочної конструкції на моделях розрахункових схем, створених в середовищі SCAD дозволяє дослідити зміни матеріалоємності отриманих варіантів з метою визначення раціональних рішень.
2. Запропонований варіант технічного рішення рами об'єкта дослідження має на 30% меншу металоємність, ніж прототип.
3. Розроблена методика варіантного проектування металеві конструкції може бути використана при виконанні проектних робіт.

CONCLUSIONS FROM THE RESULTS OF THE RESEARCH

1. The developed algorithm for studying the optimization options of the combined arched structure on the models of calculation schemes created in the SCAD environment allows us to study changes in the material consumption of the obtained options in order to determine rational solutions.
2. The proposed version of the technical solution of the frame of the research object has 30% less metal consumption than the prototype.
3. The developed method of variant design of the metal structure can be used when performing design work.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд із Зміною №1. – К., 2022. – 35 с.
2. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Зі зміною № 1. – К., 2022. – 220 с.
3. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Прогини і переміщення. Вимоги проектування. К., 2006 – 15 с.
4. ДСТУ Б В.2.6-210:2016. Оцінка технічного стану сталевих будівельних конструкцій, що експлуатуються. Київ : Мінрегіон України, 2016 – 53 с.
5. Карпіловський Ст. З., Криксунов Еге. З., Маляренко О. А. [та ін]. SCAD Office. Обчислювальний комплекс SCAD. М: Вид-во СКАД СОФТ, 2011. 656 с.
6. Городецький О. С., Шмуклер Ст. С., Бондарев А. В.. Інформаційні технології розрахунку та проектування будівельних конструкцій. Харків: НТУ "ХПІ", 2003. 889 с.
7. Городецький О. С., Євзеров І. Д. Комп'ютерні моделі. Київ: Вид-во «Факт», 2007. 394 с.
8. Трохимович С.С., Пермяков С.А. Оптимальне проектування металевих конструкцій. Київ, Вид-во «Будівельник», 1981. 136 с.
9. Перельмутер А.С., Слівкер С.І. Розрахункові моделі споруд та можливість їх аналізу. М: Вид-во СКАД СОФТ, 2011. 736 с.
14. Розвиток методів розрахунку та проектування великопрогонових просторових покриттів спортивних споруд / Горохів Є. Ст, Мущанов Ст. Ф., Касімов С.Р., Руднева І.Н., Сивоконь Ю.Н. // Просторові конструкції будівель та споруд. 2006. №10. З. 7-16.

15. Горохів Є. Ст, Мушанов Ст. Ф., Кінаш Р. І. [та ін] Конструкції стаціонарних покриттів над трибунами стадіонів. Макіївка: ДонНАБА, 2008. 403 с.

16. Єремєєв П. р. Особливості проектування унікальних великопрогонових будівель та споруд // Сучасне промислове та цивільне будівництво. 2006. №1(2). З. 5-15.

17. Пелешко І. Д., Юрченко Ст. Ст. Оптимальне проектування металевих конструкцій на етапі (огляд робіт) // Металеві конструкції. 2009. 1(15). с. 27-36.

19. Назаров Ю. П., Симбіркін Ст. Н, Городецький О. З. Комп'ютерне моделювання процесів життєвого циклу конструкцій // Актуальні проблеми досліджень з теорії споруд. 2009 №2. З. 204-216.

21. Фонарників Я. М. Варіантне проектування та оптимізація сталевих конструкцій. М.: Будвидав, 1979. 319 с.

22. Холопов І. З., Попов А. н. Багатокритеріальна оптимізація елементів металевих конструкцій в умовах САПР // Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини. 1999. С. 226-234.

24. Гаріфуллін М.Р., Семенов С.А., Беляєва С.В., Пориваєв І.А., Сафіуллін М.М., Семенов А.А. Пошук раціональної геометричної схеми просторової металевої конструкції покриття великопрогонової спортивної споруди. Будівництво унікальних будівель та споруд. ISSN 2304-6295. 2 (17). 2014. 107-1225. Magalhães, F., Caetano, E., Cunha, Á. Operational modal analysis and finite element model correlation of the Braga Stadium suspended roof // Engineering Structures. 2008. 30 (6). Pp. 1688-1698

26. Dynamic monitoring of a stadium suspension roof: Wind and temperature influence on modal parameters and structural response / Martins N., Caetano E., Diord S., Magalhães F., Cunha Á. // Engineering Structures. 2014. No. 59. pp. 80-94.

27. Analysis of Montreal Olympic Stadium roof under natural loading conditions / Lazzari M., Majowiecki M., Vitaliani R. V., Saetta A. V. Nonlinear F.E. // Engineering Structures. 2009. No. 31 (1), pp. 16-31.

28. Experimental Study on the Spatial Roof Structure of 80,000-seat Stadium in Shanghai / Zuyan Sh., Yangji Ch., Qingyun L., Xianzhong Zh., Nianliang Y., Yingru Lin. // *Advances in Steel Structures (ICASS '96)*. 1996, pp. 601-606.

29. Lozano-Galant J. A., Payá-Zaforteza I. Structural analysis of Eduardo Torroja's Frontón de Recoletos' roof // *Engineering Structures*. 2011. No. 33 (3). Pp. 843-854.

30. Cai J., Feng J., Jiang Ch. Development and analysis of a long-span retractable roof structure // *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. No. 92. Pp. 175-182.

31. The San Nicolas Church in Gandia (Spain) or how Eduardo Torroja devised a new, innovative and sustainable structural system for long-span roofs / Nuñez-Collado G., Garzon-Roca J., Paya-Zaforteza I., Adam J. M // *Engineering Structures*. 2013. No. 56. Pp. 1893-1904.

32. Ding Zh., Tamura Y. Contributions of wind-induced overall and local behaviors for internal forces in cladding support components of large-span roof structure // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2013. No. 115. Pp. 162-172.

33. Borri C., Majowiecki M., Spinelli P. Wind response of a large tensile structure: The new roof of the Olympic stadium in Rome // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1992. 42(1-3). Pp. 1435-1446.

34. Kinash R., Kopylov O., Walaszczyk J. Research on the influence of stadium's roof shape on its aerodynamic load // *Environmental effects on buildings, structures, materials and people*. 2007. Pp. 97-109.

35. Majowiecki M. Snow and wind experimental analysis in the design of long-span sub-horizontal structures // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1998. No. 74-76. Pp. 795-807.

36. Biagini P., Borri C., Facchini L. Wind response of large roofs of stadiums and arena // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. No. 95 (9-11). Pp. 871-887.