

**МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ
ВЕЛИКОПРОЛІТНОГО СТРУКТУРНОГО БЛОКУ СИСТЕМИ «КИСЛОВОДСЬК»
ДЛЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ**

Попов В. О., Власко А. А., Вальков О. О.

У статті розглянуто особливості моделювання металоконструкцій великопролітних структурних систем на прикладі нестандартного просторового перекриття системи «Кисловодськ», яке обпирається на п'ять несучих колон, з врахуванням ефектів перерозподілу зусиль між елементами пропорційно їх жорсткості; розроблено алгоритм розрахунку подібних конструкцій; удосконалено методику моделювання напружено-деформованого стану структур методом скінчених елементів у середовищі програмного комплексу "Lira"; виявлено найбільш небезпечні ділянки конструкції, які локалізовані в основному поблизу опорних стійок; запропоновано оригінальне конструктивне рішення капітелі центральної опорної стійки з чотирьохвузловим обпиранням структурного блоку; представлено конструктивні рекомендації з підвищення надійності будівельних конструкцій перекриття, що зменшують ймовірність появи аварійних ситуацій.

Ключові слова: структура, великопролітна система, скінчено-елементна модель, оптимізація конструкцій.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
КРУПНОПРОЛЕТНОГО СТРУКТУРНОГО БЛОКА СИСТЕМЫ «КИСЛОВОДСК»
ДЛЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Попов В. О., Власко А. А., Вальков О. О.

В статье рассмотрены особенности моделирования металлических конструкций большепролетных структурных систем на примере нестандартного пространственного перекрытия системы «Кисловодск», которое опирается на пять несущих колонн, с учетом эффектов перераспределения усилий между элементами пропорционально их жесткости; разработан алгоритм расчета подобных конструкций; усовершенствована методика моделирования напряженно-деформированного состояния структур методом конечных элементов в среде программного комплекса "Lira", выявлены наиболее опасные участки конструкции, которые локализованы в основном, вблизи опорных стоек; предложено оригинальное конструктивное решение капители центральной стойки с четырехузловым опиранием структурного блока; представлены конструктивные рекомендации повышения надежности строительных конструкций перекрытия, которые снижают вероятность возникновения аварийных ситуаций.

Ключевые слова: структура, большепролетная система, конечно-элементная модель, оптимизация конструкций.

**THE MODELING OF STRESS-CONDITION OF STRENGTHENING OF LARGE-SPAN
STRUCTURAL BLOK OF KYSLOVODSK'S SYSTEM TO OPTIMIZATION ITS
STRUCTURAL DESIGN**

V. Popov, A. Vlasko, O. Valkov

In this article have been examine features of modeling the metal construction of large-span systems as an example of non-typical spatial overlapping of Kislovodsk's system which stand on five bearing columns consideration an effect of forces reparation between elements according to its stickiness; have been developed an algorithm of calculation of the same structures; have been improved method of modelling of tensely-stress condition of structures by finite element method at standard PC-program Lira, have been localized strongly strained fragments of construction which take position in general around bearing columns; have been offered the original construction of four-units capital of central column; have been offered recommendations to the reliabilities enlargement of the structures elements and

technological to the lowering of probability of emergency situations.

Keywords: structure, large-span systems, super-elements model, optimization of construction.

Вступ

На сьогодні в Україні широко розбудовується мережа потужних одноповерхових складських приміщень для зберігання негорючих матеріалів і виробів. Такі об'єкти економічно доцільно будувати у найстисліші терміни у приміській зоні обласних та районних центрів зі зручними транспортними розв'язками обабіч магістральних чи кільцевих доріг. Тому в основному для їх будівництва використовують металеві каркасні системи, які є легкими, технологічними і, водночас, за умови ефективного вогнезахисту, надійними будівельними конструкціями саме для складів різного призначення. Однак, в умовах сучасних реалій, гострим залишається питання економії матеріальних ресурсів.

За часів Радянського Союзу, особливо у кінці 80-х років минулого сторіччя, на території України поблизу колгоспів, віддалених від заводів з виробництва збірного залізобетону, масово зводилися складські будівлі-зерносховища з металевими полегшеними швидкомонтуємими каркасами системи «ЦНИИСК» та «Кисловодськ» (рис. 1). Перебудова на рейки ринкової економіки в перше десятиріччя незалежності, недолуге бюрократичне керівництво та масова міграція населення з села у місто призвели до швидкого занепаду колгоспів і, водночас, до розкрадання їх матеріальної бази. Тому, на сьогодні, від новеньких складських приміщень залишилися тільки їх скелети – металеві каркаси, які, не зважаючи на оголений стан, в основному знаходять у гарному технічному стані.

Каркасні системи «ЦНИИСК» мають модульний розмір структурного блоку 12 x 18 м та 12 x 24 м у вигляді системи суцільнозварних плоских ферм з рівнополичних кутиків, які збираються на болтових кріпленнях у єдину просторову ферму, та колон з широкополичних чи колонних двотаврів, розташованих у кутах цих блоків. Тому будівельні конструкції складів, що зводяться на основі таких структурних блоків, мають уніфіковані типорозміри, кратні 12, 18 та 24 м відповідно.

Структурні просторові ферми системи «Кисловодськ» є конструктивним різновидом системи «Меро» та «МАрХИ» [12]. Структурний блок виготовляється з окремих елементів – круглих труб, які збираються у чотиригранні піраміди з допомогою багатогранного з'єднувача – конектора, який виготовляється методами точної відливки, фрезерування та свердління на станках з програмним управлінням. Елемент має стандартну довжину – 3 м і, відповідно, висота структурної плити – 2,12 м. Таким чином покриття, несучими конструкціями якого є структурний блок «Кисловодськ», може мати довільну довжину і ширину, кратну 3 м, та може бути і не прямокутним в плані.

Отже, з огляду на велику вартість металу та його обробки, доцільним та актуальним є використання металевих конструкцій структурних блоків, які демонтуються з занедбаних складських територій колгоспів та переносяться в зони, де бурхливо розвивається промисловість і сільське господарство. З огляду на архітектурно-планувальні вимоги для покриття складських площ

Питаннями розроблення ефективних конструктивних рішень структурних покриттів та методів аналізу їх напружено-деформованого стану займалися такі відомі інженери і вчені як М.Л. Гринберг, В.М. Шимановський, Б.О. Миронков, В.М. Гордєєв, М.М. Сахновський, Л.М. Лубо, Б.О. Фурманов, Я.О. Клячін, В.В. Бірюльов, Г.Г. Чибряков, М.М Жербін [1 – 3, 5, 7, 10, 13 – 15]. У їх роботах описані методики моделювання, розрахунку та підходи до оптимального проектування стандартних прямокутних блоків із типовою сіткою колон. Однак на цей час не достатньо вивченими залишаються питання оптимізації конструктивних рішень нестандартних структурних систем, наприклад, із додатковими консольними кроквяними фермами, та питання раціонального конструювання опорних колон, які влаштовують поза межами конекторів.

Постановка проблеми

Мета роботи – на прикладі каркасу металевого покриття, який вмонтовується у існуючий комплекс будівельних об'єктів, конструктивно складається частково з демонтованих конструкцій системи «Кисловодськ» і, частково, з нових металевих консольних ферм розміром в плані 51 x 30 м, відпрацювати методику оцінки напружено-деформованого стану подібних систем з врахуванням ефектів перерозподілу внутрішніх зусиль у відповідності до жорсткості елементів. Шляхом послідовного перебору невіддільних станів, визначити раціональне розташування опорних

конструкцій і мінімально необхідну кількість колон та фундаментів, локалізувати найбільш небезпечні ділянки структурного блоку. Для досягнення поставленої мети необхідно виконати комплекс задач, наведених нижче:

- запропонувати раціональне конструктивне рішення полегшеного комбінованого покриття з використанням металевих елементів, які були у експлуатації;
- розробити методику моделювання комбінованого перекриття, яке, частково, складається з нестандартного структурного блоку і, частково, з кроквяних консольних ферм;
- дослідити ефекти перерозподілу зусиль у багатократно статично невизначений структурній системі, що завантажена кліматичними впливами, в залежності від жорсткості її елементів;
- розробити конструктивні рекомендації з приєднання класичних консольних кроквяних ферм до структурних блоків, принципове рішення капітелей колон з чотирьохвузловим обпиранням елементів.

Основна частина

Поставлені у роботі задачі було вирішено на прикладі комбінованого металевих каркасу, для складських приміщень ТОВ «Еко-Сфера» м. Калинівка. Металокаркас складається з нестандартного структурного блоку розміром 42×18 м, зібраного за системою «Кисловодськ» до якого пропонується приєднувати консольні ферми, що не передають навантаження на сусідні будівлі.

Шляхом перебору можливих компоновальних рішень з врахуванням технологічних особливостей складського приміщення було виявлено найбільш раціональне розташування основних і проміжних колон, виходячи з критерію мінімізації витрат на фундаменти. Було виявлено, що доцільною кількістю є шість головних опорних колон, розташованих як показано на рис. 1.

У наукових працях [1, 5, 7, 12] доведено, що висота просторової структурної ферми лімітується, в основному, критерієм жорсткості. Мінімальна висота структурного блоку виходячи з умов жорсткості при врахуванні компоновальних особливостей згідно з [12, с. 142] та вимог нормативів [4, 6, 8, 11] може бути представлена в узагальненому вигляді:

$$h_{\min} = 4 \cdot \xi \cdot \frac{R_y}{\gamma_n \cdot \gamma_{fm} \cdot E \cdot (1 + \varphi)} \cdot \frac{l^2}{f_u} \cdot k, \quad (1)$$

де $\gamma_n = 0,975$ – коефіцієнт надійності для споруд з середнім рівнем відповідальності з класом наслідків СС-2 при розрахунку за 2 групою граничних станів, γ_{fm} – коефіцієнт надійності за навантаженням,

$\xi = \frac{0,32 + 0,92 \cdot \mu - 0,24 \cdot \mu^2}{12,9} = \frac{1,034}{12,9}$ – коефіцієнт, який враховує прямокутну форму структурної плити та умови обпирання блоку на колони, f_u – граничний прогин, що приймається за [11], R_y, E – розрахунковий опір та модуль пружності сталі елементів структурного блоку відповідно, φ – осереднений коефіцієнт повздовжнього згину для стиснутих стрижнів поясів, l – менший розмір блоку, $k = (1,1 \dots 1,2)$ – коефіцієнт, який враховує підвищення деформативності за рахунок піддатливості ґратки структурного блоку, $\mu = L/l = 16,5/15 = 1,1$ – коефіцієнт різнобічності прямокутника.

Оскільки елементи структурного блоку виготовлені з трубчатого прокату зі Сталі 20, $R_y = 225 \text{ МПа}$. Підставлення вказаних величин у формулу (1) дає орієнтовне значення висоти структурної плити виходячи з умов жорсткості $h_{\min} \approx 1350 \dots 1400 \text{ мм}$.

Структурний блок «Кисловодськ» складається з чотиригранних рівносторонніх призм висотою $h = 2120 \text{ мм}$ по осям елементів, тобто його компоновальна висота значно більша за h_{\min} . Архітектурно-планувальним недоліком вбудованих будівель є відсутність бічного освітлення внутрішніх приміщень. Тому такі споруди рекомендується оснащувати горищним освітленням через заклені пірамідальні ліхтарі розмірами в плані 6 x 6 м (див. рис. 1).

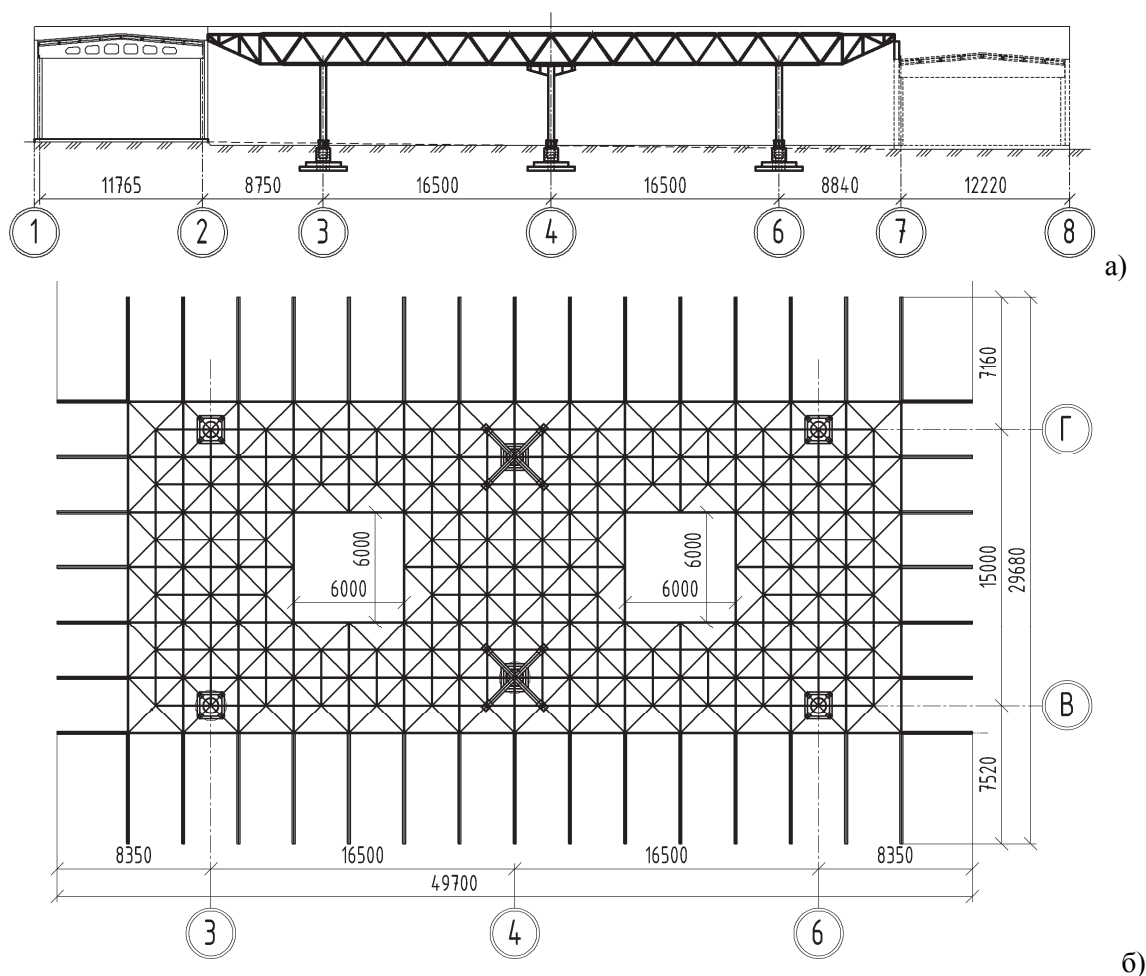


Рисунок 1 – Принципове конструктивне рішення комбінованого покриття, яке вмонтовується всередину існуючої забудови: а – розріз; б – план металокаркасу в рівні верхнього поясу структурного блоку

Класичний алгоритм розрахунку подібних споруд аналогічний розрахунку будь-яких статично невизначених систем та реалізовується наступним чином.

1. Виконується збір навантажень.
2. Засобами програмного комплексу розробляється скінчено-елемента модель споруди, елементам якої попередньо призначаються перерізи виходячи з критеріїв граничної гнучкості.
3. Виконується статичний розрахунок із розкриттям статичної невизначеності та визначенням внутрішніх зусиль (для структур це, переважно, зусилля розтягу-стиск N).
4. Виконується підбір перерізів з умов міцності та стійкості.

Аналогічні операції були виконані і для вказаної системи. Виявлено, що найбільш навантаженими елементами верхнього поясу є повздовжні та поперечні стрижні, що межують з середніми опорними колонами (максимальне зусилля розтягу) та в прольоті між колонами (великі стискаючі зусилля), нижнього поясу – дзеркально – поблизу центральних стійок – максимальні зусилля стиску і в прольоті – значні розтягуючі зусилля. Навантажені розкоси зосереджені в зоні опорних крайніх і середніх колон.

Задача з остаточного підбору перерізів елементів не викликає складнощів. Однак, оскільки структурні системи, як і будь-які інші просторові полегшені конструкції покриття, проектуються за принципом рівномірного розподілу матеріалу, а не його концентрації, необхідним є повторний перевіряючий розрахунок після коригування жорсткостей елементів.

Під час подальших досліджень виявлено, що при встановленні в моделі перерізів елементів адекватних внутрішнім зусиллям та таких, що відповідають умовам уніфікації (не більше 6...8 типорозмірів стрижнів), відбувається складний нелінійний перерозподіл зусиль всередині статично невизначеної просторової ферми. Наприклад, у розглянутому випадку зусилля в поперечних стрижнях зменшуються, а в повздовжніх, навпаки, збільшуються. Модель вимагає

повторного коригування. Скінчено-елементна модель та результати розрахунків після багатократних «ітерацій» наведено на рис. 2. Добре видно, що напружені стрижні зосереджуються вздовж прольоту по балочній схемі. Така система починає працювати як нелінійна стрижнева плита з осередками (ребрами) жорсткості.

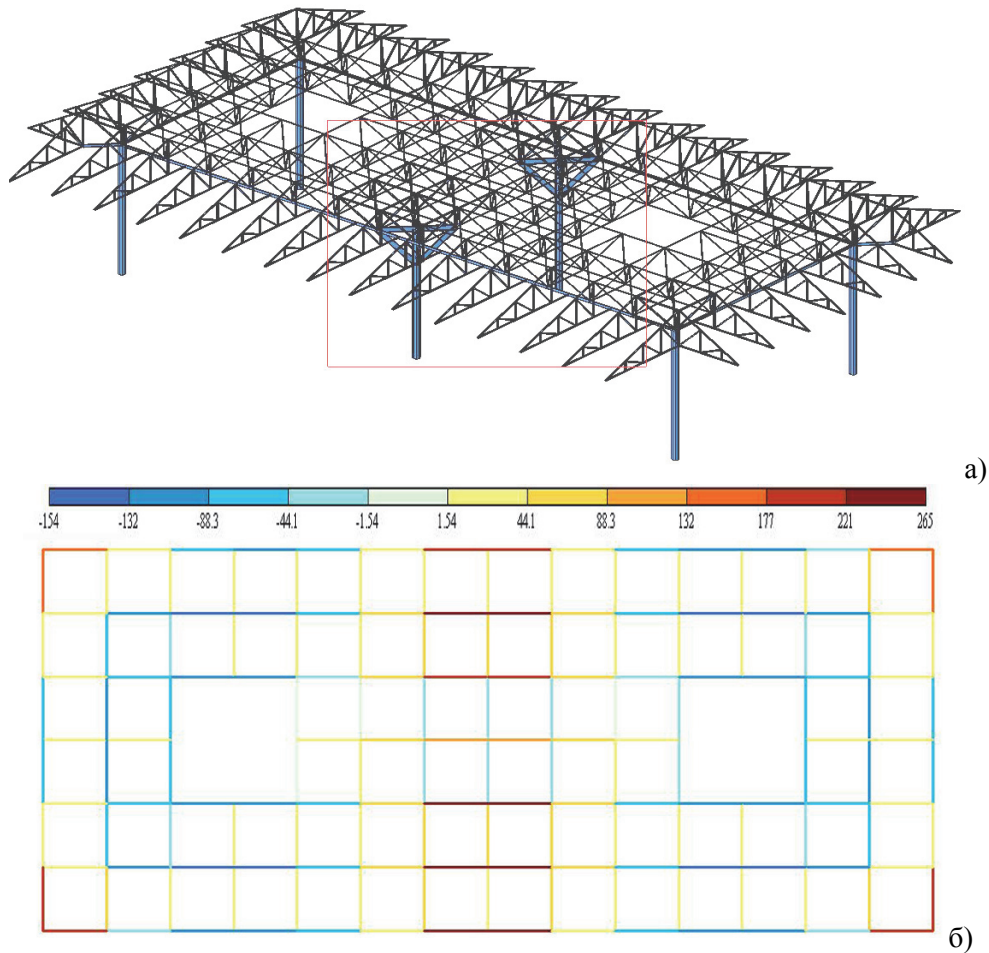


Рисунок 2 – Комбіноване структурно-ферменна споруда: а – скінчено-елементна модель, б – розподіл зусиль розтягу-стиску [кН] у елементах верхнього поясу після багаторазових коригувань перерізів елементів (симетричне розташування снігової ковдри).

Отже, класичний підхід проектування нестандартних структурних систем вимагає багатокрокових ітераційних уточнень з послідовним коригуванням жорсткісних параметрів проектованої системи для економії матеріальних ресурсів. На прикладі запропонованої конструкції покриття врахування перерозподілу зусиль дозволило зекономити до 5% металу.

Оскільки заводи з виробництва структурних систем в Україні на цей час через тривалу економічну кризу не працюють, головним джерелом «сировини» для виробництва таких споруд є існуючі структурні системи. Їх конструктивні елементи були в експлуатації, тому при проектуванні комбінованих перекриттів в нових умовах доцільним є врахування ступеня зносу. Елементи системи «Кисловодськ», загалом, мають достатньо високу зносостійкість та здатність до багаторазового монтажу-демонтажу. Вузли-конектори виготовлені, в основному, з легованих сталей, слабо піддаються корозії. Трубчасті елементи надійно заглушені з двох боків, тому не кородують з середини, а болтові затискачі з шестигранними насадками також виготовляють зі стійких легованих термічно оброблених сталей марок 40Х. Основну небезпеку для споруд, виготовлених з вказаних конструкцій повторного застосування, становлять, в першу чергу механічні, пошкодження елементів, які можуть відбутися під час демонтажу, а також, викривлення елементів, що накопичилися протягом тривалої експлуатації. Пошкоджені конструкції рекомендується рихтувати, болти, за потреби, замінювати. Стрижні, що зазнали значних викривлень, слід встановлювати у місцях прогнозованого розтягу незначної інтенсивності, елементи з дефектами різьбових частин, навпаки, у місцях локалізації зусиль стиску.

Проектувальник повинен взяти до уваги важливий постулат: у випадку підсилення ділянок, які цього не вимагають (особливо елементів верхнього та нижнього поясів просторової ферми), може відбутися такий перерозподіл зусиль, який призведе до перенапружень інших елементів і, відповідно, до зменшення надійності споруди загалом.

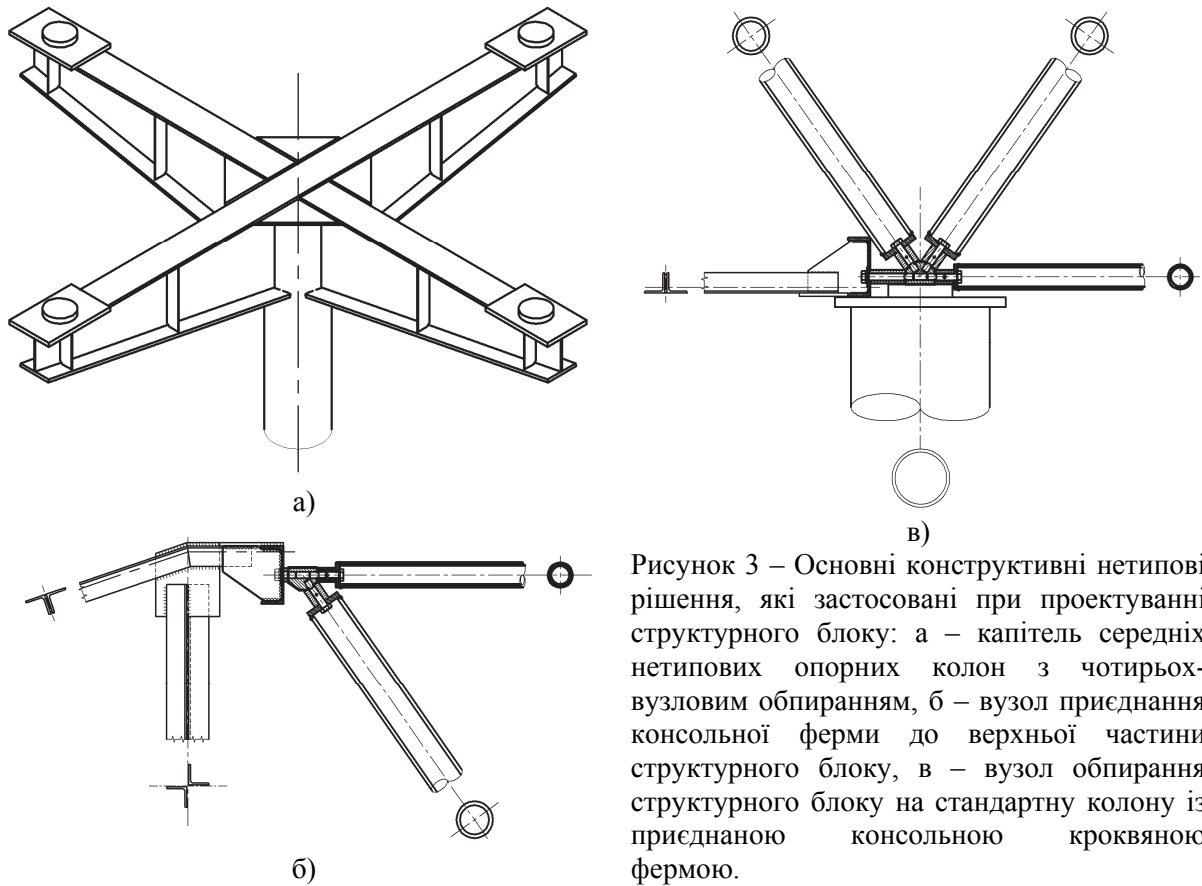


Рисунок 3 – Основні конструктивні нетипові рішення, які застосовані при проектуванні структурного блоку: а – капітель середніх нетипових опорних колон з чотирьохвузловим обпиранням, б – вузол приєднання консольної ферми до верхньої частини структурного блоку, в – вузол обпирання структурного блоку на стандартну колону із приєднаною консольною кроквяною фермою.



Рисунок 4 – Монтаж комбінованого покриття складських приміщень згідно з розробленими конструктивними рекомендаціями на підприємстві «Еко-Сфера», м. Калинівка.

Важливим та актуальним є питання конструювання нетипових опорних колон з нестандартною капітеллю, яка реалізує двох- та чотирьохвузловий спосіб обпирання. Один з можливих варіантів рішень капітелі показаний на рис. 3а. Аналіз напружено-деформованого стану таких стійок при симетричному та асиметричному завантаженні сніговою ковдрою доводить, що при інженерних розрахунках колон слід обов'язково враховувати значні ексцентриситети прикладання осьової сили.

Виявлено, що для забезпечення надійності та довговічності колон, їх опорний вузол слід проектувати жорстким. Через значну чутливість структурних систем до нерівномірного осідання основ фундаменти таких споруд слід проектувати із надлишковим запасом.

Конструктивне рішення типового вузла-конектора дозволяє достатньо легко приєднувати до структурних блоків «Кисловодськ» кроквяні конструкції інших систем. Однак вузли верхнього та нижнього поясів зміщені один відносно одного на півкроку (1,5 м) у плані, що утруднює прикріплення плоских систем. На рис. 3б та 3в показане рекомендоване принципове рішення примикання класичної консольної ферми зі спарених кутиків. Особливістю рішення є повздовжні прогони, які приєднуються до конекторів, а консольні ферми, в свою чергу, приварюються до фасонки прогонів. Таким чином крок кроквяних конструкцій може, взагалі не співпадати із кроком конекторів. Позавузлове з'єднання елементів структурного блоку та прогонів не рекомендується через небезпеку погіршення умов роботи структурних елементів внаслідок впливу місцевих згинальних моментів.

Висновки

В результаті проведених комплексних ґрунтовних науково-практичних досліджень моделей напружено-деформованого стану комбінованого перекриття у вигляді структурного блоку з консольними фермами, можна зробити такі висновки:

- набув подальшого розвитку метод розрахунку структурних систем з врахуванням нестандартних умов кріплення та ефектів перерозподілу зусиль між елементами відповідно їх жорсткості в умовах вбудовування у існуючі будівельні об'єкти;
- розроблена методика розрахунку таких конструкцій для інженерних потреб. Доведено, що класичний підхід аналізу структур методом скінчених елементів повинен бути доповнений ітераційним пошуком раціонального розташування ділянок з підвищеною жорсткістю елементів;
- розроблено конструктивні рекомендації з приєднання класичних консольних кроквяних ферм до структурних блоків та принципове рішення капітелей колон з чотирьохвузловим обпиранням елементів.

Використана література

1. Бирюлев В. В., Чибряков Г. Г. Проектирование металлических структурных конструкций и обеспечение их надежности: Учеб. пособие. Новосибирск: НИСИ, 1985. – 82 с.
2. Броуде Б. М. О закритическом поведении гибких стенок стальных стержней // Строительная механика и расчет сооружений. №1. 1976. С. 7 – 12.
3. Жербин М. М. Особо легкие стальные конструкции для промышленных и сельскохозяйственных зданий // Сер. стр-во и архит. №10. 1985. С. 11 – 16.
4. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. ДБН В.1.2-14-2009. [На заміну ГОСТ 27751, СТ СЭВ 3972-83, СТ СЭВ 3973-83, СТ СЭВ 4868-84]. [Чинний від 2009-12-01] – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 37 с.
5. Клячин А. З., Фурманов Б. А. Структурные конструкции из пирамид с фланцевым узловым сопряжением. М.: Стройиздат, 1983. – 84 с.
6. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу. ДБН В.2.6-163:2010. [На заміну СНиП II-23-81*, окрім розділів 15*-19]. [Остаточна редакція. Дата надання чинності 01.12.2011 р.] – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 202 с.
7. Лубо Л. Н., Миронов Б. А. Плиты регулярной пространственной структуры. Л.: Стройиздат, 1976. – 104 с.
8. Навантаження і впливи. Норми проектування. ДБН В.1.2-:2006. [На заміну СНиП 2.01.07-85 (крім розділу 10)]. [Чинний від 2007-01-01] – К.: Мінбуд України, 2006. – 71 с. – (Державні будівельні норми України).

9. Общие правила проектирования стальных конструкций: СП 53-102-204 / ЦНИИСК им. Кучеренко. – М.: ЦНИИСК им. Кучеренко, 2005. – 131 с.
10. Попов В. О. Безфундаментні башти-атракціони з високоточним стовбуром. Монографія / В.О. Попов, І.П. Кондратенко, А.П. Ращепкін. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 208 с.
11. Прогини і переміщення. Вимоги проектування. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. На заміну розділу 10 СНиП 2.01.07-85. [Чинний від 2007-01-01] – К.: Мінбуд України, 2006. – 10 с. – (Національний стандарт України).
12. Проектирование металлических конструкций: Спец. Курс. Учеб. Пособие для вузов / В. В. Бирюлев, И. И. Кошин, И. И. Крылов, А. В. Сильвестров. – Л.: Стройиздат, 1990. – 432 с.
13. Рекомендации по проектированию структурных конструкций / ЦНИИСК им. Кучеренко. М.: Стройиздат, 1984. – 303 с.
14. Трофимов В. И., Бегун Г. Б. Структурные конструкции (исследование, расчет и проектирование). М.: Стройиздат, 1972. – 272 с.
15. Шимановский В. Н., Гордеев В. Н., Гринберг М. Л. Оптимальное проектирование пространственных решетчатых покрытий. Киев: Будівельник, 1987. – 224 с.

Попов Володимир Олексійович – к.т.н., доцент кафедри промислового та цивільного будівництва Вінницького національного технічного університету.

Власко Анна Анатоліївна – магістрант факультету будівництва, теплоенергетики та газопостачання Вінницького національного технічного університету.

Вальков Олег Олександрович – магістрант факультету будівництва, теплоенергетики та газопостачання Вінницького національного технічного університету.

Попов Владимир Алексеевич – к.т.н., доцент кафедры промышленного и гражданского строительства Винницкого национального технического университета.

Власко Анна Анатольевна – магистрант факультета строительства, теплоэнергетики и газоснабжения Винницкого национального технического университета.

Вальков Олег Александрович – магистрант факультета строительства, теплоэнергетики и газоснабжения Винницкого национального технического университета.

Popov Volodymyr – Ph.D, assistant professor of Industrial and Civil Engineerings Department, Vinnitsia National Technical University.

Vlasko Anna – undergraduate of faculty of buildings, power system and gas supply Vinnitsia National Technical University.

Valkov Oleg – undergraduate of faculty of buildings, power system and gas supply Vinnitsia National Technical University.