

УДК 624.012.3:624.014

doi:10.31650/2707-3068-2024-28-128-139

ВРАХУВАННЯ СУМІСНОЇ РОБОТИ ДИСКІВ ПОКРИТТІВ ЗІ ЗБІРНОГО ЗАЛІЗОБЕТОНУ У СКЛАДІ ПРОЛІТНИХ ЗГИНАЛЬНИХ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Дмитренко Є.А., к.т.н., доцент,
zdmitrenko26@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0238-5384

Андрієвська М.А., магістерка
andrievskam5@gmail.com

Яковенко І.А., д.т.н., професор,
i2103@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4256-9855

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ

Анотація. Виконаний порівняльний розрахунок плоскої сталевий ферми покриття із парних кутиків просторового каркасу одноповерхової промислової будівлі за загальноприйнятою розрахунковою схемою, – без врахування сумісної роботи з диском покриття, а також з врахуванням спільної роботи каркасу із залізобетонними ребристими плитами. Обґрунтовано використання чисельного моделювання фрагмента покриття методом скінченних елементів у ПК «ЛІРА САПР 2022» шляхом порівняльного аналізу внутрішніх зусиль в елементах ферми та її загальної маси за двома розрахунковими моделями.

Ключові слова: просторовий сталевий каркас, чисельна модель, розрахункова схема, жорсткий диск покриття, залізобетонні ребрісті плити, внутрішні зусилля.

Постановка проблеми. На території України побудована значна кількість одноповерхових промислових будівель, виконаних у сталевому каркасі з настилом із залізобетонних плит покриття. У відповідності до результатів чисельних обстежень будівель та інженерних споруд [1, 2 та ін.], конструкції таких будівель мають дефекти та пошкодження, які не задовольняють [3] і не відповідають проєктним рішенням у відповідності до діючих нормативних документів за [4–6 та ін.]. Такі конструкції не забезпечують подальшої надійної експлуатації [7] і потребують проведення відновлювальних робіт.

Актуальності набувають задачі визначення дійсної несучої здатності, стійкості та деформативності каркасів одноповерхових і багатоповерхових промислових будівель, причому, як при реконструкції [8], так і при новому будівництві таких будівель [9] із врахуванням складного деформування [10], нових ефектів опору [11] та прийнятих гіпотез побудови розрахункових схем [12], зчеплення арматури з бетоном [13], інженерного захисту територій [14] тощо. Саму тому пошук оптимальних [15] і неординарних конструктивних рішень [16–18] з комплексним врахуванням сумісної роботи несучих елементів із сталі та бетону при їхньому розрахунку [17–20] призводить до суттєвого економічного ефекту порівняно з розрахунками за ідеалізованими розрахунковими схемами.

Аналіз останніх джерел і публікацій. Моделювання сумісної роботи несучих конструкцій зі сталі та бетону під час розрахунку стало можливим завдяки реалізації методу скінченних елементів (МСЕ) у різних розрахункових комплексах (SCAD, ЛІРА САПР, ANSYS, Nastran тощо), використання яких набуло широкого застосування [21–24].

Економічна доцільність від врахування сумісної роботи сталевих та залізобетонних конструкцій відмічається у багатьох країнах Європи, США, Канаді тощо. Зрештою, це призвело до виникнення і подальшого впровадження EuroCODE4 [25] із гармонізацією його на теренах України у ДСТУ-Н Б EN 1994-1-1:2010.

Виконання розрахунку балкових елементів та ферм покриття у відповідності до вищевикладених передумов, і спрощення без врахування спільної роботи з конструкціями каркасу будівлі (у тому числі і залізобетонними плитами) отримують перерізи елементів зі

значним запасом міцності, і як наслідок, – перевитрату матеріалу, що призводить до значного здорожчання конструкцій [26]. Дослідженням дійсної роботи кроквяних ферм одноповерхових промислових будівель підтверджено включення у спільну роботу залізобетонних плит покриття при дотриманні певних конструктивних вимог. Це значно зменшує значення поздовжнього зусилля у верхньому поясі і як наслідок, дозволяє раціонально запроектиувати ферму покриття.

Постановка завдання. Основною задачею при розрахунку балкових конструкцій та збірних плит перекриття з врахуванням їхньої сумісної роботи є коректне призначення розрахункового об'єднаного перерізу балки та плити, який достовірно відображатиме роботу конструкції: товщини та ширини перерізу плити, яка включається в роботу [10, 11].

Проблемним також є питання про коректність врахування сумісної роботи дисків покриття зі збірного залізобетону при розрахунку сталевих конструкцій на згин як монолітного залізобетону та подальшого розрахунку їх як сталезалізобетонних конструкцій [1]. Розрахунок зусиль у стержнях кроквяних ферм, які працюють спільно із плитами, також спонукає до визначення коректної розрахункової схеми, яка врахувала б спільну роботу плит покриття та верхнього пояса, і, як наслідок, зниження за рахунок цього поздовжнього зусилля в останньому.

Також розрахунок елементів диска покриття та прогонових конструкцій, які складаються із збірного залізобетону, необхідно проводити із врахуванням ефекту спільної роботи конструкцій диска один із одним. Такий ефект спостерігається відразу після об'єднання конструктивних одиниць диска в єдине ціле за допомогою зварювання закладних деталей. Спільна робота елементів диска покриття залежить від деформативності поздовжнього ребра плити покриття, деформативності закладних деталей [18], призначених для закріплення плит з балками, умов закріплення плити покриття у складі диска, якості міжплитних швів замонолічування, зміни осьової та згинальної жорсткостей кроквяної конструкції у процесі деформування [9, 10].

Тому у процесі моделювання із застосуванням ефекту розвантаження [26], необхідно враховувати підвищену деформативність вузлових сполучень плит, їхню фізичну і конструктивну нелінійність, які змінюються залежно від напружено-деформованого стану [22, 24]. **Метою дослідження** є зниження матеріаломісткості згинальних металевих конструкцій ферм покриття із врахуванням їхньої сумісної роботи з жорсткими дисками покриття, виконаними зі збірного залізобетону.

Основний матеріал і результати. Моделлю дослідження є просторовий блок покриття одноповерхової промислової будівлі з розмірами в плані 24×60 м, до складу якого входять три кроквяні ферми з ухилом верхнього пояса 1,5 % за серією 1.460-4 (рис. 1). Проліт ферм – 24 , крок – 6 м. Висота ферм за геометричними осями – 3000 мм.

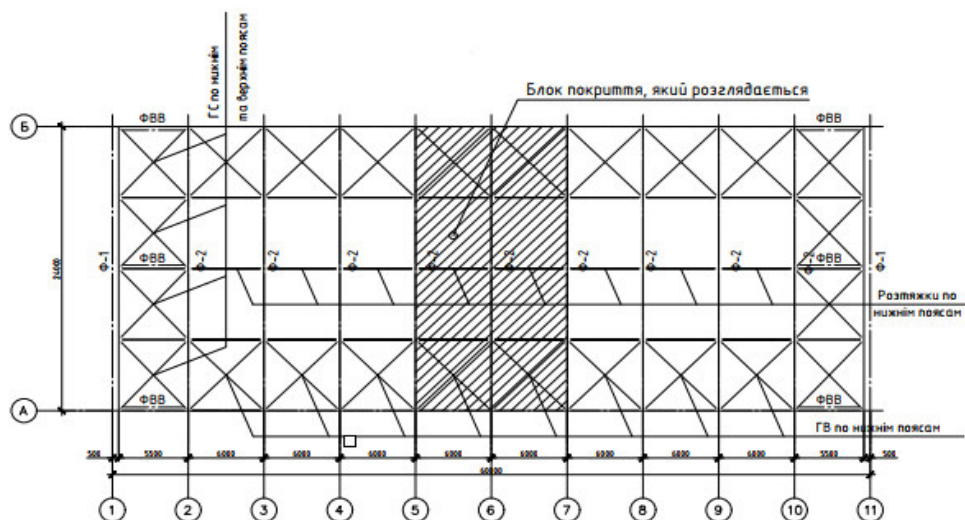


Рис. 1. Схема розташування конструкцій покриттів:

ФВВ – ферми вертикальні в'язеві, Ф-1, Ф-2 – марки кроквяних ферм

Спирання ферм на колони – зверху (шарнірне). Розглянутий блок має горизонтальні в'язі нижнього пояса і розтяжки для зменшення коливань нижнього пояса від динамічної дії кранових навантажень. В'язі мають хрестові грати, перерізи в'язей і розтяжок виконані із рівнополичних куточків. У якості покрівельного настилу застосовуються збірні залізобетонні ребристі плити за серією 1.465-7 довжиною 6 м, шириною 3 м і висотою 0,3 м. Залізобетонні плити приварюються до сталевих накладок, які з'єднуються до верхнього пояса ферм щонайменше у трьох точках шляхом зварювання. Поздовжні та поперечні шви замоноличуються дрібнозернистим важким бетоном класу С12/15 [5]. Матеріал кроквяних ферм – сталь С245 [4], залізобетонних плит покриття – бетон класу С20/25 [5].

У процесі дослідження проведений розрахунок внутрішніх зусиль та виконаний підбір перерізів елементів у кроквяних фермах, які входять у склад блоку покриття за традиційною методикою, розглядаючи ферму окремо від конструкцій каркасу будівлі, зокрема залізобетонних ребристих плит покриття. Здійснений підбір перерізів елементів в'язей дослідного блоку покриття.

Отримані перерізи елементів блоку покриття були задані у просторову розрахункову схему та визначені зусилля у стержнях найбільш навантаженої ферми блоку із врахуванням її сумісної роботи разом із плитами покриття та в'язями. За значеннями отриманих зусиль були підібрані перерізи елементів ферми та виконаний порівняльний аналіз внутрішніх зусиль та елементів ферм, обчислених із врахуванням та без врахування спільної роботи конструкцій покриття.

Збір навантажень виконаний за [6] на вантажну площу, ширина якої дорівнює кроку ферм у будівлі – 6 м. Зусилля у стержнях ферми визначалися за допомогою програмного комплексу ЛІРА САПР [13, 22, 24], прикладаючи зосереджені навантаження до вузлів ферм (рис. 2). Розрахункові зусилля отримуємо шляхом перемноження значень зусиль від одиничних навантажень та значень, отриманих при зборі навантажень. Розрахункові поєднання зусиль отримуємо, підсумовуючи максимальні значення зусиль від постійних та снігових навантажень (рис. 3).

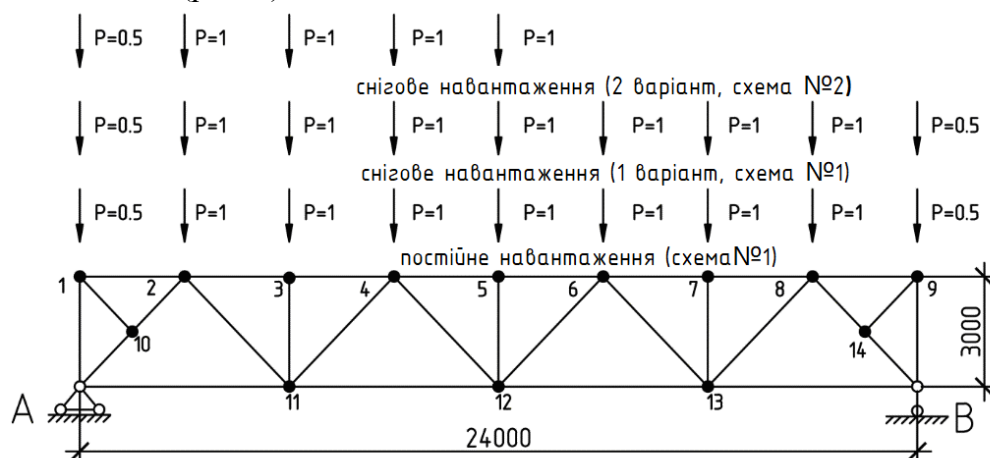


Рис. 2. Розрахункова схема ферма та схема застосування навантажень

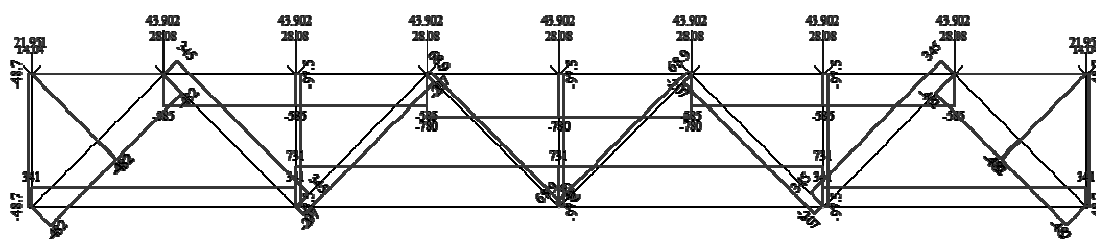


Рис. 3. Епюри внутрішніх зусиль у стержнях ферми від суми навантажень

Переріз стержнів прийнятий із двох рівнополочних куточків, з'єднання – шарнірні. Врахування сумісної роботи диска покриття зі кроквяними фермами задається через просторову розрахункову схему блоку покриття у ПК «ЛІРА САПР». Також моделюється геометрична схема просторового блоку покриття, яка складається з трьох кроквяних ферм та відповідних зв'язків. У результаті маємо стержньову конструкцію, яка містить універсальні просторові стержні типу СЕ10, які мають 6 ступенів вільності (рис. 4).

Оскільки в'язі закріплюються до ферм шарнірно, у розрахунковій схемі по кінцях стержнів вводяться шарніри щодо місцевих осей OY , OZ .

Спирання ферм на колони прийнято шарнірне, тому у крайніх точках нижнього пояса ферм у розрахунковій схемі задаємо шарнірні опори:

– у лівій точці задаємо шарнірну опору, яка забороняє лінійні зміщення ферм за трьома основними напрямками – OX , OY , OZ ;

– у правій точці задаємо лінійно-рухливу опору, яка забороняє лінійні зміщення ферм за двома основними напрямками – OY , OZ .

Всім стержням задаємо жорсткості, визначені у попередніх розрахунках.

Полку залізобетонних плит у розрахунковій схемі задаємо універсальними чотирикутними СЕ оболонками – СЕ 44, безпосередньо об'єднаними із верхнім поясом кроквяних ферм, який розбивається на окремі стержні в залежності від розміру скінченного елемента, на який розбивається полиця плити (рис. 5).

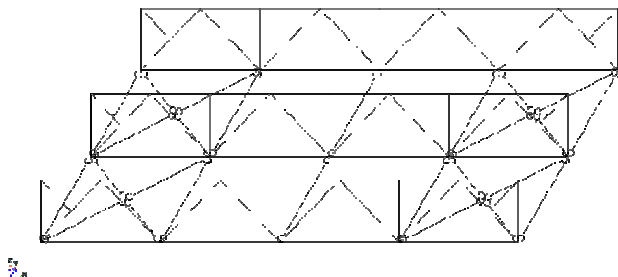


Рис. 4. Розрахункова схема блоку покриття без плит

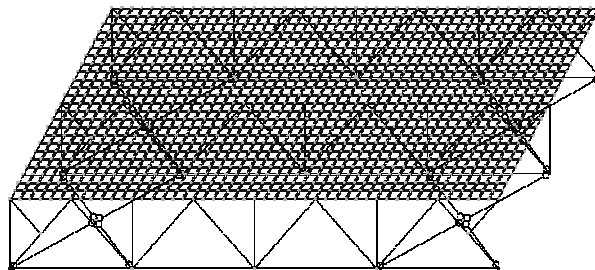


Рис. 5. Розрахункова схема блоку покриття з полицею плит

Жорсткість перерізу полиці призначаємо як для бетонного пластинчастого елемента, вводячи в розрахунковому комплексі початковий модуль пружності бетону – $E_{cm} = 3 \times 10^4 \text{ МПа}$ і коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,2$.

Значний вплив на достовірність отриманих результатів розрахунку із використанням МСЕ має розмір скінченноелементної сітки [22]. З метою визначення рівня впливу розміру скінченних елементів на результати розрахунку зусиль в елементах ферм, а також для отримання достовірного результату та проведення подальших розрахунків були виконані розрахунки блоку покриття з різними розмірами комірки полиці плити.

Послідовно були виконані розрахунки блоку покриття із наступними розмірами комірки скінченноелементної сітки плити:

- сітка із коміркою 500×500 , кількість вузлів у схемі – 1250;
- сітка із коміркою 250×250 , кількість вузлів у схемі – 4778;
- сітка із коміркою 150×150 , кількість вузлів у схемі – 13066;
- сітка із коміркою 100×100 , кількість вузлів у схемі – 29186;
- сітка із коміркою 75×75 , кількість вузлів у схемі – 51706;

Критерієм достовірності розрахунку є значення різниці між максимальним зусиллям у верхньому поясі найбільш навантаженої ферми блоку, розрахованим за аналізованою та попередньою схемами розрахунку. Значення різниці не має перевищувати 3% [22].

Графік залежності максимального стискаючого зусилля у верхньому поясі найбільш навантаженої кроквяної ферми від розміру кінцевої сітки наведений на рис. 6.

Згідно представленого графіку (рис. 7) різниця між зусиллям у верхньому поясі найбільш навантаженої ферми блоку, розрахованим за схемою із сіткою 100×100 та 75×75 не

перевищує 3%. Отже, результати розрахунків внутрішніх зусиль за цими схемами вважатимуться достовірними.

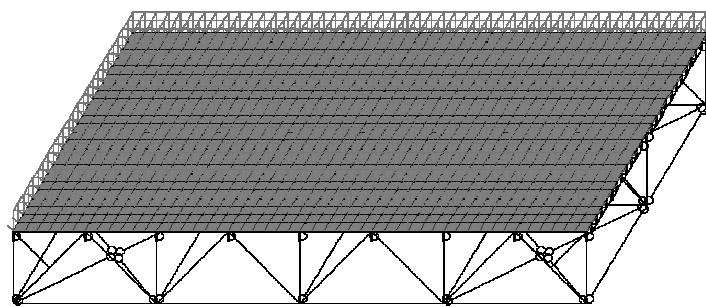


Рис. 6. Навантаження, прикладене на 1 м^2 блоку покриття

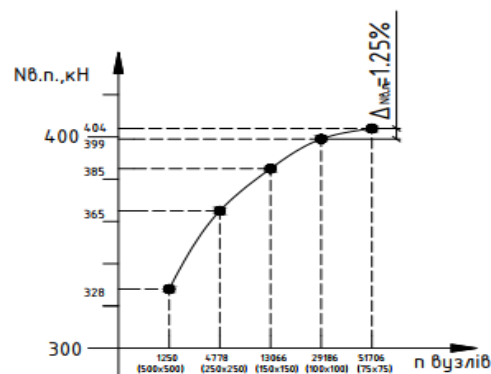


Рис. 7. Графік залежності зусилля у верхньому поясі ферми від розбивки сітки скінченних елементів плити

Прийнята розрахункова схема блоку покриття із розмірами сітки скінченних елементів $75 \times 75\text{ мм}$. Деформована схема блоку покриття представлена на рис. 8.

Були проаналізовані зусилля у найбільш навантаженій кроквяній фермі (рис. 9).

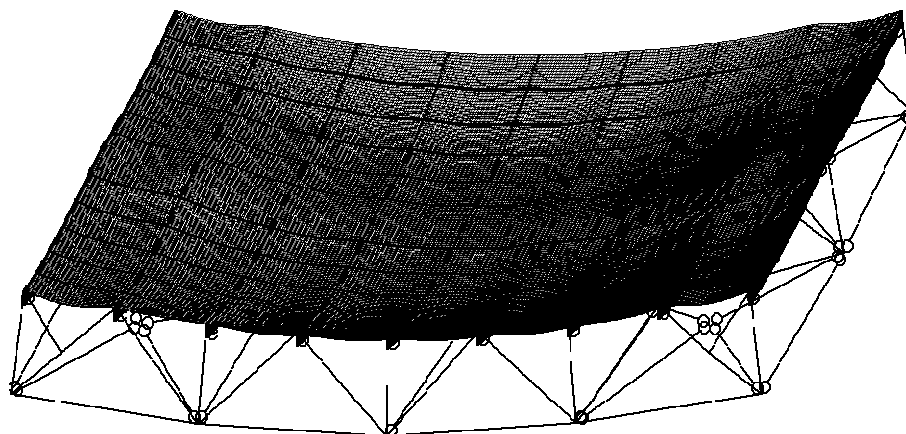


Рис. 8. Деформована схема блоку покриття із коміркою скінченно-елементної сітки $75 \times 75\text{ мм}$

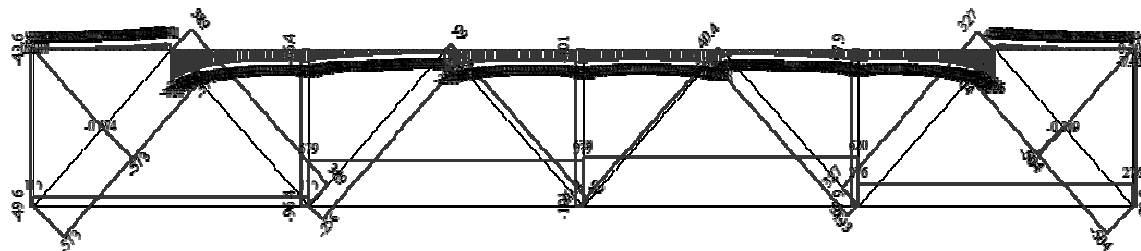


Рис. 9. Зусилля у стержнях ферми із врахуванням її спільної роботи із диском покриття від суми снігового та постійного навантажень

Згідно з рис. 9, зусилля у верхньому поясі розподіляється дещо інакше порівняно зі схемою ферми, яка була розрахована окремо від конструкцій каркасу:

- зусилля розподіляється нерівномірно по довжині елементів пояса, досягаючи максимальних значень на початку елемента пояса та зменшуючись до його кінця;
- зусилля має найбільше значення в елементі, що примикає до опорного розкосу, тоді як максимальне значення зусилля у фермі, що розраховується за плоскою розрахунковою схемою, спостерігається в елементах, розташованих у середині прольоту.

Для аналізу внутрішніх зусиль у стержнях ферми заносимо результати розрахунків внутрішніх зусиль за плоскою та просторовою розрахунковими схемами у табл. 1.

Таблиця 1

Порівняльна таблиця розрахунку зусиль у стержнях сталеві ферми покриття

Елементи	Номер стержня	Розрахункове зусилля без врахування спільної роботи, кН	Розрахункове зусилля із врахуванням спільної роботи, кН	Ефект від спільної роботи (зміна значення зусилля)
Верхній пояс	1–2	0	69,1	–
	2–3	-584,71	-404	0,691
	3–4		-150	0,257
	4–5	-779,62	-243	0,312
Нижній пояс	A–11	341,08	276	0,809
	11–12	730,89	620	0,848
Розкоси	A–10	-482,4	-573	1,189
	2–10			
	1–10	0	-0,309	–
	2–11	344,98	389	1,128
	4–11	-206,6	-256	1,239
Стійки	4–12	88,64	99	1,117
	3–11	-97,45	-97,9	1,005
	5–12		-101	1,036

Виходячи із отриманих результатів, можна зробити висновок про те, що врахування спільної роботи кроквяної конструкції та жорсткого диска покриття призводить до значного зменшення зусиль у поясах ферми.

$$\Delta N_{\text{в.л.}} = \frac{N_{\text{в.л.},1} - N_{\text{в.л.},2}}{N_{\text{в.л.},1}} \cdot 100\% = \frac{779,62 \text{ кН} - 404 \text{ кН}}{779,62 \text{ кН}} \cdot 100\% = 48,2\%, \quad (1)$$

де $N_{\text{в.л.},1}$ – максимальне зусилля, яке діє у верхньому поясі під час розрахунку без врахування спільної роботи конструкцій покриття, кН; $N_{\text{в.л.},2}$ – те ж саме, лише із врахуванням спільної роботи конструкцій.

З формули (1) та аналізу [26] випливає, що розрахунок підтверджує результати досліджень Л.С. Васильєвої, яка стверджує, що ефект від включення до спільної роботи плит із кроквяними фермами знаходиться у межах 40–50%.

Однак слід зауважити, що при цьому зусилля в елементах решітки ферми збільшуються незначно, зокрема в опорному розкосі, в якому спостерігається найбільший приріст стискання зусилля, – збільшується на 18,9%.

За отриманими зусиллями виконаний підбір перерізів елементів сталеві ферми покриття, результати зведені до табл. 2.

Результати підбору перерізів за зусиллями, розрахованими із врахуванням спільної роботи конструкцій, у порівнянні з розрахунками за ідеалізованою схемою, отримано:

- зменшення перерізу елементів верхнього пояса ферми із $\perp 140 \times 12$ до $\perp 100 \times 10$;
- зменшення перерізу елементів нижнього поясу ферми із $\perp 100 \times 8$ до $\perp 90 \times 8$;
- збільшення перерізу опорного розкосу ферми із $\perp 100 \times 12$ до $\perp 125 \times 10$;
- збільшення перерізів елементів решітки, зокрема переріз елемента 2–11 збільшився до $\perp 75 \times 6$ (порівняно з $\perp 75 \times 5$), а переріз елемента 4–11 – до $\perp 100 \times 10$ (порівняно з $\perp 100 \times 8$);
- перерізи інших елементів ферми не змінилися.

Також слід зауважити, що максимальне значення вертикального прогину в середині прольоту ферми становило 34,11 мм, у той час як при розрахунку ферми без врахування спільної роботи прогин у середині прольоту становив 61,43 мм. Звідси випливає, що із розрахунку спільної роботи ферм із залізобетонними плитами, прогин ферм зменшився на 44,5%.

Таблиця 2

**Переріз стержнів ферми, підбрані за зусиллями,
визначеними із врахуванням сумісної роботи конструкцій покриття**

Елементи	Номер стержня	Розрахункове зусилля, кН	Переріз, мм	$A, \text{см}^2$	$I_x/I_y, (I_x \text{ та } I_y \text{ у см}^4)$	$i_x/i_y, (i_x \text{ та } i_y \text{ у см})$	λ_x/λ_y	$[\lambda]$	φ	γ_c	Перевірка за напруж., кН/см ²
Верхній пояс	1-2	69,1	70×5	13,72	300/255	2,16/3,23	138,9/78,9	150	–	0,9	5,04 < 21,6
	2-3	-404	100×10	38,4	300/255	3,05/4,52	97,4/56,4	122	0,5667	0,8	18,57 < 19,2
	3-4	-150						158,5			6,89 < 19,2
	4-5	-243	100×10	38,4	300/255	3,05/4,52	97,4/56,4	145,1	0,5667	0,8	11,17 < 19,2
Нижній пояс	A-11	276	90×8	27,8	600/510	2,76/4,08	217,4/125	400	–	1,0	9,93 < 24
	11-12	620								1,0	22,3 < 24
Розкоси	A-10 2-10	-573	125×10	48,6	217,5/435	3,85/5,52	56,5/78,8	129,1	0,6439	0,9	18,31 < 21,6
	1-10	-0,309≈0	70×5	13,72	217,5/217,5	2,16/3,23	100,7/100,7	180	–	0,9	-
	2-11	389	75×6	14,78	391,5/369,8	2,3/3,44	170,2/107,5	400	-	1,0	22,15 < 24
	4-11	-256	100×10	38,4	391,5/369,8	3,05/4,52	128,4/81,8	159,5	0,4127	0,8	16,15 < 19,2
	4-12	99	70×5	13,72	391,5/369,8	2,16/3,23	181,3/114,5	400	–	1,0	7,22 < 19,2
Стійки	3-11 5-12	-97,9 -101	70×5	13,72	283,5/267,8	2,16/3,23	131,25/82,91	154,2	0,3997	0,8	17,85 < 19,2
								152,4			18,42 < 19,2

Результати розрахунку металоємності елементів ферм, розрахованих з врахуванням їхньої спільної роботи із жорстким диском покриття та без нього, зводимо у табл. 3.

Таблиця 3

Розрахунок витрати металу на сталеві ферми покриття, підбрані за двома схемами

Елементи	Номер стержня	Переріз ел-ту з розрахунку I	Переріз ел-ту з розрахунку II	Пог. маса ел-ту з розрахунку I, кг/м.п.	Пог. маса е-ту з розрахунку II, кг/м.п.	Довжина елемента, м	Маса ел-ту з розрахунку I	Маса ел-ту з розрахунку II	Різниця за масою, %
Верхній пояс	1–2	70×5	70×5	10,76	10,76	3,00	32,28	32,28	–
	2–3	140×12	100×10	51	30,2	9	459	271,8	40,78
	3–4								
	4–5								
Нижній пояс	A–11	100×8	90×8	24,4	21,8	12	292,8	261,6	10,66
	1–2								
Розкоси	A–10	100×12	125×10	35,8	38,2	4,243	151,9	162,083	-6,28
	2–10	70×5	70×5	10,76	10,76	2,18	23,403	23,403	–
	1–10								
	2–11		75×6	11,6	13,78	4,35	50,46	59,943	-15,82
	4–11		100×10	24,4	30,2	4,35	106,14	131,37	-19,2
	4–12		70×5	10,76	10,76	4,35	46,806	46,806	–
Стійки	3–11	70×5	70×5	10,76	10,76	3,00	32,28	32,28	–
	5–12	70×5	70×5	10,76	10,76	3,00	32,28	32,28	–
РАЗОМ:							1227,3	1053,8	–
Маса всієї ферми:							2454,7	2107,69	14,14%

Примітка:

1. Розрахунок складено для половини ферми.
2. Розрахунок I – розрахунок без врахування сумісної роботи конструкцій, розрахунок II – розрахунок із врахуванням сумісної роботи конструкцій.
3. Різниця за масою обчислюється за наступною формулою:

$$\Delta = \frac{m_2}{m_1} \cdot 100\%, \quad (2)$$

де m_1 – маса елемента із розрахунку I, m_2 – те ж, з розрахунку II.

4. За довжину елемента прийнято геометричну довжину елемента.

Економія по масі ферми при врахуванні спільної роботи конструкцій покриття склала:

$$E_M = M_1 - M_2 = 2454,7 \text{ кг} - 2107,69 \text{ кг} = 347,01 \text{ кг}, \quad (3)$$

де M_1 , M_2 – умовна маса елементів ферми за розрахунками I та II.

Економічний ефект (у %) становить:

$$E_{eff} = \frac{E_M}{M_1} = \frac{347,01 \text{ кг}}{2454,3 \text{ кг}} \cdot 100\% \approx 14,14\%. \quad (4)$$

Врахування сумісної роботи кроквяної ферми та ребристих залізобетонних плит покриття дозволяє суттєво зекономити матеріал несучих конструкцій (14,14%) порівняно з розрахунком окремо навантаженої ферми та повинен бути обов'язково врахований при проектуванні нових будівель та реконструкції існуючих.

Висновки.

1. Розрахунок кроквяних сталевих ферм із врахуванням спільної роботи з диском покриття зі збірного залізобетону показує значне зниження зусиль у верхньому поясі – 48,2%, що відповідає наявним результатам експериментальних досліджень, дійсної роботи кроквяних ферм, виконаних під час аналізу роботи [26]. Також поздовжні зусилля дещо знизилися у нижньому поясі (на 17,9%) і зросли в опорному розкосі (на 18,9%) та елементах решітки (до 23,4%).

2. Під час розрахунку кроквяних ферм із врахуванням спільної роботи з диском покриття зі збірного залізобетону спостерігається зменшення значення прогину нижнього пояса в середині прольоту ферми на 44,5%.

3. Характер розподілу поздовжнього зусилля у верхньому поясі у випадку спільної роботи із диском покриття не відповідає такому для плоскої розрахункової схеми, вирізняючись нерівномірністю розподілу за довжиною елементів і розташуванням максимального значення.

4. Зміна значень внутрішніх зусиль у стержнях сталеві ферми під час розрахунку з врахуванням спільної роботи з диском покриття призвела до значного зниження маси елементів кроквяної конструкції – 14,14% у порівнянні з розрахунком за традиційною плоскою розрахунковою схемою. Це дає змогу суттєво заощаджувати матеріал опорних конструкцій і має бути обов'язково враховуватися під час проектування і реконструкції будівель та споруд.

Однак, розробка точного та надійного розрахункового апарату за представленим напрямком потребує продовження чисельних досліджень шляхом моделювання нелінійної роботи матеріалів, врахування різних класів бетону шва та конструкцій, закладних деталей плит та верифікації результатів шляхом проведення натурних експериментальних досліджень.

Література

1. Клименко Є.В. Забезпечення просторової стійкості при реконструкції житлових будинків минулих років забудови / Є.В. Клименко, О.Ю. Гілодо, А.М. Арсірій //

Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць. – 2018. – Вип. 36. – С. 372–379.

2. Бакулін Є.А. Результати аналізу причин руйнування сталевих ферм покриття конверторного цеху / Є.А. Бакулін, І.А. Яковенко, Є.А. Дмитренко, В.М. Бакуліна // Збірник тез доповідей 9-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті» (17–19 листопада, 2021 р., м. Харків). – Харків, УкрДУЗТ, 2021. – С. 87–88.

3. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ : ДБН В.1.2-14:2018. – [Чинний від 2019-01-01]. – К. : УкрНДПроекстальконструкція, 2018. – 60 с. – (Державні будівельні норми України).

4. Сталеві конструкції. Норми проектування : ДБН В.2.6-198:2014. – [Чинні від 2015-01-01]. – К.: Мінрегіон України, Державне підприємство «Укрархбудінформ», 2014. – 205 с. – (Державні будівельні норми).

5. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування : ДСТУ Б.В.2.6-156:2010. – [Чинний з 2011-06-01]. – К. : Мінгеріонбуд України, 2011. – 118 с. – (Національний стандарт України).

6. Навантаження і впливи: норми проектування : ДБН В.1.2.-2:2006. – [Чинний з 2007-01-01]. – К. : Мінгеріонбуд України, 2006. – 68 с. – (Державні будівельні норми України).

7. Пічугін С.Ф. Розрахунок надійності будівельних конструкцій : монографія / С.Ф. Пічугін. – Полтава: ТОВ «АСМІ», 2016. – 520 с.

8. Гольшев А.Б. Теория и расчет железобетонных сборно-монолитных конструкций с учетом длительных процессов : монография / А.Б. Гольшев, Вл. И. Колчунов, И.А. Яковенко. – К. : «Талком», 2013. – 337 с.

9. Білик С.І. Металеві конструкції. Том 2. Конструкції металевих каркасів промислових будівель: підручник для ВНЗ / С.І. Білик, О.В. Шимановський та ін. – Кам'янець-Подільський : Рута, 2021. – 448 с.

10. Павліков А.М. Залізобетонні конструкції в умовах складного деформування та їх розрахунок: навчальний посібник / А.М. Павліков, О.В. Гарькава. – Полтава : ПолтНТУ, 2018. – 130 с.

11. Практичний посібник із розрахунку залізобетонних конструкцій за діючими нормами України (ДБН В.2.6-98:2009) та новими моделями деформування, що розроблені на їхню заміну / [Бамбура А.М., Павліков А.М., Колчунов В.І. та ін.]. – К. : Толока, 2017. – 627 с. URL: <http://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/5380>

12. Kolchunov V.I. On the use of the hypothesis of flat sections in reinforced concrete / V.I. Kolchunov, I.A. Yakovenko // Building and Reconstruction. – 2011. – №6(38). – P. 16–23. URL: <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/52682>

13. Колчунов В. И. Конечно-элементное моделирование нелинейной плоской задачи сцепления бетона и арматуры в ПК Лира-САПР / В. И. Колчунов, И. А. Яковенко, Е. А. Дмитренко // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2016. – №3. – С. 6–15.

14. Бакулін Є.А. Інженерний захист та підготовка територій : навч. посіб.; за ред. канд. техн. наук Бакуліна Є.А. / Є.А. Бакулін, І.А. Яковенко, В.М. Бакуліна. – К. : НУБіП України, 2020. – 212 с.

15. Klymenko Ie. Civil Construction. Optimization of architectural, constructive, organization and technological decisions : collect. monog. / [Klymenko Ie., Menejljuk O., Cherepashchuk L., Grynyova L., Menejljuk I., Nikiforov O., Sayenko D. – Saarbrücken : LAP Lambert Academic Publishing, 2019. – 112 p. URL: <http://mx.ogasa.org.ua/handle/123456789/8306>

16. Баби́ч Є.В. Конструктивні рішення та розрахунок елементів захисних споруд цивільного захисту з залізобетонними арочними покриттями / Є.М. Баби́ч, В.Д. Кочкарьов, С.В. Філіпчук, Б.В. Караван // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць. – 2021. – Вип. 39. – С. 162–176.

17. Стороженко Л.І. Дослідження просторової роботи та напружено-деформованого стану нової структурно-вантової сталезалізобетонної конструкції / Л.І. Стороженко, Г.М. Гасій // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2018. – №1. – С. 19–22.
18. Semko O.V., Classification of Self-stressed Steel-Concrete Composite Structures / O.V. Semko, A.V. Hasenko // Proceedings of the 3rd International Conference on Building Innovations. ICBI 2020. Lecture Notes in Civil Engineering. – 2022. – Vol. 181. – P. 367–374. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85043-2_34
19. Чихладзе Э.Д. Основы расчета и проектирования комбинированных и сталебетонных конструкций : монография / Чихладзе Э.Д., Ватуля Г.Л., Китов Ю.П., Черненко Н.Г., Берестянская С.Ю., Веревичева М.А., Опанасенко Е.В. – Киев : Транспорт, 2006. – 104 с.
20. Гасенко А.В. Самонапряжения сталезалізобетонних конструкцій : монографія / А.В. Гасенко. – Полтава: ПП «Астроя», 2022. – 312 с.
21. Стороженко Л.І. Чисельне моделювання сталезалізобетонних елементів методом скінчених елементів / Л.І. Стороженко, П.О. Семко, О.І. Єфіменко // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. – 2018. – Вип. 9. – С. 129–135.
22. Барабаш М.С. Основы комп'ютерного моделювання : навч. посібник / М.С. Барабаш, П.М. Кір'язєв, М.А. Ромашкіна. – К. : НАУ, 2018. – 492 с.
23. Kos Z., Bearing Capacity near Support Areas of Continuous Reinforced Concrete Beams and High Grillage / Z. Kos, Ye. Klymenko, I. Karpiuk, I. Grynyova // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12. – Iss.2: 685. – 21 p. URL: <https://doi.org/10.3390/app12020685>
24. Дмитренко Є.А. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт за дисциплінами «САПР у будівництві», «Моделювання будівель та споруд сільськогосподарського призначення» підготовки фахівців ОС «Магістр» за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» / уклад.: Є.А. Дмитренко, І.А. Яковенко, О.А. Фесенко. – К. : НУБіП України, 2021. – 104 с. URL: <http://dglb.nubip.edu.ua/handle/123456789/9717>
25. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings : EN 1994-1-1:2004. – 118 p.
26. Дмитренко Є.А. Моделювання сумісної роботи сталевих балкових конструкцій із залізобетонними ребристими плитами перекриття / Є.А. Дмитренко // Будівельні конструкції. Теорія і практика. – 2021. – Вип. 8. – С. 44–57. URL: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.8.2021.44-57>

References

- [1] Ye.V. Klymenko, O.U. Hilodo, A.M. Arsirii, “Zabezpechennia prostоровoi stiikosti pry rekonstruktsii zhytlovykh budynkiv mynulykh rokiv zabudovy”, *Resource-saving Materials, Constructions, Buildings and Structures*, vol. 36, pp. 372–379, 2018.
- [2] Ye.A. Bakulin, I.A. Yakovenko, Ye.A. Dmytrenko, V.M. Bakulina, “Rezultaty analizu prychn ruinuvannia stalevykh ferm pokryttia konvertornoho tsekhu” in *Proc. IX In. sc. & techn. conf. Problems of Reliability and Durability of engineering Structures and Buildings in Railway Transport*, Kharkiv, 2021, pp. 87–88.
- [3] *Zahalni pryntsypy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel, sporud, budivelnykh konstruktsii ta osnov*, DBN V.1.2-14:2018, Derzhavni budivelni normy Ukrainy, 2018.
- [4] *Stalevi konstruktsii. Normy proektuvannia*, DBN V.2.6-198:2014, Derzhavni budivelni normy Ukrainy, 2014.
- [5] *Betonni ta zalizobetonni konstruktsii z vazhkoho betonu. Pravyla proektuvannia*, DSTU B.V.2.6–156:2010, Natsionalnyi standart Ukrainy, 2010.
- [6] *Navantazhennia i vplyvy: normy proektuvannia*, DBN V.1.2.–2:2006, Derzhavni budivelni normy Ukrainy, 2006.

- [7] S.F. Pichuhin, *Rozrakhunok nadiinosti budivelnykh konstruksii*. Poltava: ASMI, 2016.
- [8] A.B. Golishev, V.I. Kolchunov, I.A. Yakovenko, *Teoriya i raschet zhelezobetonnykh sborno-monolitnykh konstruksii s uchetom dlitelnykh protsessov*. Kyiv: Talkom, 2013.
- [9] S.I. Bilyk, O.V. Shymanovskiy & oth., *Metalevi konstruksii. Tom 2. Konstruksii metalevykh karkasiv promyslovykh budivel*. Kamianets-Podilskyi: Ruta, 2021.
- [10] A.M. Pavlikov, O.V. Harkava, *Zalizobetonni konstruksii v umovakh skladnoho deformuvannia ta yikh rozrakhunok*. Poltava: PoltNTU, 2018.
- [11] A.M. Bambura, A.M. Pavlikov, V.I. Kolchunov, D.V. Kochkarov, I.A. Yakovenko, *Praktychnyi posibnyk iz rozrakhunku zalizobetonnykh konstruksii za diiuchymy normamy Ukrainy (DBN V.2.6-98:2009) ta novymy modeliamy deformuvannia, shcho rozrobleni na yikhniu zaminu*. Kyiv: Toloka, 2017.
- [12] V.I. Kolchunov, I.A. Yakovenko, "On the use of the hypothesis of flat sections in reinforced concrete", *Building and Reconstruction*, No 6, Vol. 38, pp. 16–23, 2011. Available at: <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/52682>
- [13] V.I. Kolchunov, I.A. Yakovenko, Ye.A. Dmytrenko, "Konechno-elementnoe modelirovanie nelineinoi ploskoi zadachi stsepleniya betona i armatury v PK Lira-SAPR", *Industrial Construction and Engineering Structures*, vol.3, pp. 6–15, 2016.
- [14] Ye.A. Bakulin, I.A. Yakovenko, V.M. Bakulina, *Inzhenernyi zakhyst ta pidhotovka terytorii*. Kyiv: NULeS of Ukraine, 2020.
- [15] Ie. Klymenko, O. Menejlyuk, L. Cherepashchuk, L. Grynyova, I. Menejlyuk, O. Nikiforov, D. Sayenko, *Civil Construction. Optimization of architectural, constructive, organization and technological decisions*. Saarbrücken : LAP Lambert Academic Publishing, 2019. Available at: <http://mx.ogasa.org.ua/handle/123456789/8306>
- [16] Ye.M. Babych, V.D. Kochkarov, S.V. Filipchuk, B.V. Karavan, "Konstruktyvni rishennia ta rozrakhunok elementiv zakhysnykh sporud tsyvilnoho zakhystu z zalizobetonnyymi arochnymi pokryttiamy", *Resource-saving Materials, Constructions, Buildings and Structures*, vol. 39, pp. 162–176, 2021.
- [17] L.I. Storozhenko, H.M. Hasii, "Doslidzhennia prostorovoi roboty ta napruzhenodeformovanoho stanu novoi strukturno-vantovoi stalezalizobetonnoi konstruksii", *Industrial Construction and Engineering Structures*, vol.1, pp. 19–22, 2018.
- [18] O.V. Semko, A.V. Hasenko, "Classification of Self-stressed Steel-Concrete Composite Structures" in *Proc. of the 3rd Int. Conf. on Building Innovations. ICBI 2020. Lecture Notes in Civil Engineering*, 2022, vol. 181, pp. 367–374. [19] E.D. Chikhladze, G.L. Vatulya, Yu.P. Kitov, N.G. Chernenko, S.Yu. Berestyanskaya, M.A. Verevicheva, Ye.V. Opanasenko, *Osnovi rascheta i proektirovaniya kombinirovannykh i stalebetonnykh konstruksii*. Kiev: Transport, 2006.
- [20] A.V. Hasenko, *Samonapruzheniia stalezalizobetonnykh konstruksii*. Poltava: Astraia, 2022.
- [21] L.I. Storozhenko, P.O. Semko, O.I. Yefimenko, "Chyselne modeliuvannia stalezalizobetonnykh elementiv metodom skinchennykh elementiv", *Modern Technologies and Calculation Methods in Construction*, vol. 9, pp. 129–135, 2018.
- [22] M.S. Barabash, P.M. Kiriaziev, M.A. Romashkina, *Osnovy kompiuternoho modeliuvannia*. Kyiv: NAU, 2018.
- [23] Z. Kos, Ye. Klymenko, I. Karpiuk, I. Grynyova, "Bearing Capacity near Support Areas of Continuous Reinforced Concrete Beams and High Grillages", *Applied Sciences*, vol. 12, iss.2:685, 21 p, 2022. Available at: <https://doi.org/10.3390/app12020685>
- [24] Ye.A. Dmytrenko, I.A. Yakovenko, O.A. Fesenko, *Metodychni vkazivky do vykonannia laboratornykh robot za dystsyplinamy «SAPR u budivnytstvi», «Modeliuvannia budivel ta sporud silskohospodarskoho pryznachennia» pidhotovky fakhivtsiv OS «Mahistr» za spetsialnistiu 192 «Budivnytstvo ta tsyvilna inzheneriia» haluzi znan 19 «Arkhitektura ta budivnytstvo»*. Kyiv: NULeS of Ukraine, 2021. Available at: <http://dglib.nubip.edu.ua/handle/123456789/9717>

- [25] *Design of composite steel and concrete structures: Eurocode 4: Part 1-1: General rules and rules for buildings*, EN 1994-1-1:2004, 2004.
- [26] Ye.A. Dmytrenko, “Modeliuvannia sumisnoi roboty stalevykh balkovykh konstrukttsii iz zalizobetonnykh rebrystymy plytamy perekryttia”, *Building Structures. Theory and Practice*, vol. 8, pp. 44–57, 2021. Available at: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.8.2021.44-57>

TAKING INTO ACCOUNT THE JOINT OPERATION OF PRECAST CONCRETE COATING DISKS AS PART OF SPAN BENDING METAL STRUCTURES

Dmytrenko Ye.A., Ph.D., Associate Professor,
zdmitrenko26@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0238-5384

Andrievska M.A., Student of Master's Degree,
andrievskam5@gmail.com

Yakovenko I.A., Doc. of Eng. Sc., Professor,
i2103@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4256-9855

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv

Abstract. Traditional methods of beam's structures calculation for industrial buildings' coatings provide their consideration separately from the frame structures, in particular, reinforced concrete slabs, without taking into account their joint work, which leads to a significant safety margin of structures. Today, there is a significant number of industrial buildings and structures that require strengthening and reconstruction in Ukraine. In this regard, studies of the actual load-bearing capacity of single-storey industrial building frames are particular importance, both during reconstruction and new construction. Their results will significantly reduce costs and allow for more rational design of structures. At the same time, one of the most relevant areas is the study of the joint operation of metal load-bearing structures with precast concrete structures of hard discs coatings and slabs in their calculation. Moreover, in the Ukrainian national design standards, as well as in the educational and methodological literature, the calculation methods for taking into account the joint operation of such structures are not fully covered.

The purpose of study is to assess the reduction of metal consumption for steel truss structure in its bending calculation, taking into account the joint operation with a rigid precast concrete slab disc.

Method. As part of the study, It was calculated a flat roof truss from the paired corners of an one-storey industrial building according to the traditional design scheme – without taking into account the joint operation with the slab disc and taking into account the joint operation with the slabs by means of numerical modelling as part of a roof block using the finite element method. The modelling of the pavement fragment (block) was performed in LIRA FEM 2022 software.

The main results. It is performed a comparative analysis of the internal forces in steel truss elements and the total mass of the truss based on the selected cross-sections of its elements by two design models. The practical significance of the obtained results is to determine the economic effect by reducing the material consumption and the degree of unloading of steel trusses as part of the roofing block of a one-storey industrial building, taking into account their joint operation with hard discs of precast concrete slabs.

Key words: spatial steel frame, numerical model, calculation scheme, hard disk cover, reinforced concrete precast slabs, internal forces.