

**Г. О. ГНАТЕНКО, В. О. КОВАЛЕНКО, В. П. РУБАШКА, В. В. СТРИЖАК,
О. В. ТУРЧИН**

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ХАРАКТЕРИСТИК ОКРЕМИХ ЕЛЕМЕНТІВ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЇ НА СТІЙКОСТІ ПАЛЕТНИХ СТЕЛАЖІВ

В статті розглядаються питання аналізу чутливості стійкості стележної конструкції до зміни жорстких параметрів її основних конструктивних елементів – стійок, балок та розкосів. Аналіз чутливості проводиться на основі розробленої 3-D моделі стележу, що враховує топологію стележу, властивості всіх складових елементів та особливості зав'язків, що поєднують ці елементи в єдину пружну конструкцію. На основі розрахунку коефіцієнтів чутливості визначено внесок жорстких параметрів кожного елемента у стійкість усієї системи.

Ключові слова: стележ, балка, розкіс, стійкість, коефіцієнт запасу стійкості, аналіз чутливості, коефіцієнти чутливості.

G. GNATENKO, V. KOVALENKO, V. RUBASHKA, V. STRYZHAK, O. TURCHYN

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF THE CHARACTERISTICS OF INDIVIDUAL ELEMENTS OF METAL STRUCTURE ON THE STABILITY OF PALLET RACKS

The article considers the issues of analyzing the sensitivity of the stability of a rack structure to changes in the rigid parameters of its main structural elements - racks, beams and braces. These elastic elements have their own stiffness properties and are in a constant force relationship when the rack is loaded, so the parameters of each of them contribute to the stability of the elastic structure. Clarification of the elements whose parameters make the greatest contribution to the stability of the elastic structure will open up the possibility of influencing stability by changing the elastic parameters of these elements. The sensitivity analysis of the stability of the rack to changes in the parameters of the component elements is the subject of this article. The sensitivity analysis is carried out on the basis of the developed 3-D model of the rack, which takes into account the topology of the rack, the properties of all component elements and the features of the ties that combine these elements into a single elastic structure. To implement this approach, the increment method was used, based on the alternate change of one input parameter while fixing the others and calculating the increase in the output parameter of the model. It helps to understand how individual input variables affect the final result, and to assess the degree to which output indicators depend on changes in data, assumptions, or conditions. Based on the calculation of sensitivity coefficients, the contribution of the rigid parameters of each element to the stability of the entire system is determined.

Keywords: rack, beam, brace, stability, safety factor, sensitivity analysis, sensitivity factors

Вступ і обґрунтування актуальності. Складські комплекси мають велике значення у сучасній логістиці для перерозподілу вантажопотоку. Саме склади дають можливість накопичувати, концентрувати вантажі, роблячи транспортування доцільним та ефективним.

Для складування вантажу застосовуються спеціальні металеві конструкції - стележі, що призначені для зберігання предметів та матеріалів, що складаються з багатоярусних настилів, укріплених на стійках. Сучасні стележі орієнтовані на мінімізацію займаної площі та упрощення доступу до предметів та матеріалів, що зберігаються.

Основні елементи конструкції палетного стележу докладно охарактеризовано у роботі [1]. Стійки (вертикальні опори) є основою стележу, до якої кріпляться решта елементів. Стійки виконуються з перфорацією для регулювання висоти балок та формування розкісної системи. Кріпляться до основи складу за допомогою спеціальних пластин - підп'ятників. Балки є основними несучими елементами стележу. При досить невеликій власній масі балки відрізняються високою вантажопідйомністю – до 4,5 тон. За допомогою спеціальних елементів (кронштейнів) балки приєднуються до стійок. Завдяки конструкції кронштейна та перфораційним відверням на стійці балки можуть легко переставлятися по висоті стележу. Розкоси – тонкостінні елементи, які об'єднують дві стійки в раму стележу, що надає йому певної жорсткості та стійкості. Виготовляються із тонкостінних гнутих елементів.

Стелажна конструкція може мати велику кількість прольотів та багато рівнів балок (Рис. 1). Висота сучасних стелажів може досягати 12 м, (а в деяких випадках до 30 м), а вантажопідйомність до 20 т на одну секцію [2].

Як видно з наведеного опису, сучасні палетні стелажі є складними просторовими металевими конструкціями, що складаються з різноманітних пружних елементів, які знаходяться під впливом просторової системи сил. Оскільки стелажі схильні до значних вертикальних навантажень, особливої актуальності набувають питання забезпечення стійкості як складових елементів, так і всієї конструкції в цілому. [3]. Актуальність розрахунків на стійкість обумовлена також потребами сучасного ринку. Економічний підхід у використанні матеріалів при проектуванні стелажних конструкцій з одного боку та забезпечення безпеки та збереження вантажу з іншого боку роблять необхідними для проведення подібних досліджень.



Рис. 1 – Сучасний палетний стелаж [2]

Огляд досліджень. Через особливу актуальність проблеми стійкості стелажів у наш час ведуться чисельні дослідження в цій галузі. Детальний аналіз робіт зі стійкості стелажних систем наведено у великій кількості статей вітчизняних та зарубіжних авторів [3, 4, 5, 6].

У цих роботах автори з урахуванням оболонкових чи балочних моделей за допомогою теоретичних та експериментальних досліджень розглядають питання стійкості окремих елементів стелажних систем: перфорованих тонкостінних елементів стійок, врахування специфіки болтових з'єднань розкосів зі стійками стелажу, з'єднань «зачепом» кронштейнів зі стійками та ін.

Велика увага приділяється удосконаленню методів дослідження стійкості всієї стелажної конструкції, застосування сучасних методів досліджень, що ґрунтуються на численних методах розрахунку стійкості пружних систем. [7,8]

Особливий інтерес становитиме роботи, в яких вивчаються шляхи підвищення стійкості стелажних конструкцій без залучення додаткових зміцнювальних елементів або суттєвого підвищення матеріаломісткості всієї конструкції, а отже, і вартості її виготовлення. Такий підхід використовує можливості регулювання конструкції сучасного стелажу за рахунок наявності збірно-розбірних з'єднань основних елементів. Тому відкривається можливість без залучення додаткових ресурсів не тільки підвищити надійність роботи механічної системи, а й знизити вартість її виготовлення за допомогою більш раціонального використання цих ресурсів.

Наприклад, у статті [1] авторами показано, що за рахунок перестановки балок по висоті стелажу можна не тільки підвищувати стійкість усїєї конструкції, але й впливати на форму втрати стійкості всього стелажу, переводячи її із загальної (згінальної) форми у місцеву форму

втрати стійкості окремих елементів. У роботі [3] проведено дослідження, що показують залежність стійкості стелажу від жорсткості вузлів кріплення стійок до основи складу. Показано, що тільки за рахунок правильного вибору схеми розташування анкерних болтів можна досягти суттєвого підвищення стійкості стелажу. У роботі [9] автори показали, що за рахунок зміни висоти кріплення балки до кронштейна можна збільшити жорсткість вузла з'єднання балки зі стійкою, що в свою чергу позначиться на стійкості стелажу.

У роботі [10] аналізується вплив виду розкритої системи на стійкість рами стелажу. Показано, що болтові з'єднання істотно впливають на стійкість рами. Особливістю конструкції стійки є наявність відкритого профілю поперечного перерізу. У роботі показано, що в місцях болтових з'єднань відкритий профіль «замикається» і кількість таких перемичок впливає на стійкість пружної системи.

Таким чином, з проведених досліджень випливає, що стійкістю стелажу можна управляти. Подальшим розвитком цього напрямку може бути аналіз впливу параметрів окремих елементів на поведінку всієї пружної конструкції. Стійки, балки, розкоси, підп'ятники, кронштейни це пружні конструктивні елементи, що мають свої жорсткості властивості. При навантаженні стелажу вони знаходяться у постійному взаємозв'язку та параметри кожного з них роблять свій внесок у стійкість пружної конструкції. З'ясування елементів, параметри яких роблять найбільший внесок у стійкість пружної конструкції, відкриє можливість впливу на стійкість за рахунок зміни пружних параметрів саме цих елементів. Аналіз чутливості стійкості стелажу до зміни параметрів складових елементів є предметом цієї статті.

Мета: визначення напрямків підвищення стійкості палетних стелажів за рахунок управління властивостями складових конструкційних елементів..

Результати досліджень. Для проведення досліджень використовувалася 3D модель палетного фронтального стелажу яка докладно описана в роботах [1,3]. Дана модель враховує всі основні особливості конструкції стелажу – конфігурацію перфорованих стійок, балок, розкосів. Розроблено 3D моделі кронштейнів та підп'ятників. У моделі враховується специфіка з'єднання елементів між собою болтовими з'єднаннями та з'єднання «зачепом». Передбачено кріплення стійок до основи складу за допомогою підп'ятників. Таким чином, побудована модель стелажу може бути використана для досягнення поставленої мети – оцінки ступеня впливу жорстких параметрів окремих елементів на стійкість усієї конструкції.

Основними формами втрати стійкості конструкцій є місцева та загальна. Місцева форма характеризується появою хвилеподібних випуклостей і западин на окремих елементах конструкції, тоді як загальна втрата стійкості означає втрату стабільності всією конструкцією.

Деформативна схема стелажу за загальної форми втрати стійкості представлена на рис. 2. У цьому випадку вся конструкція стелажу зазнає критичних згинальних деформацій. На рисунку показано, що у загальній схемі беруть участь усі елементи. Усі стійки згинаються в одному напрямку. Такий вигин стійок спричиняє досить складний плоский вигин балок. Особливо це помітно нижніх ярусах (рис. 3).

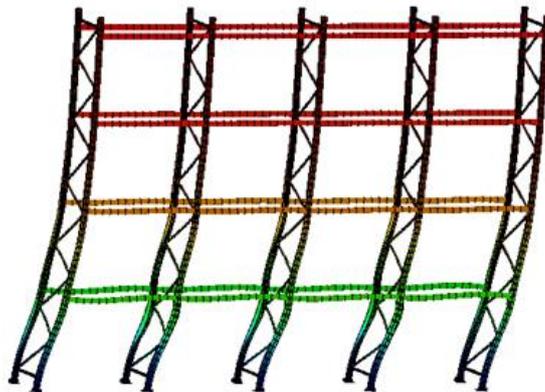


Рис. 2 – Загальна (згинальна) форма втрати стійкості стелажу

Найменшою мірою в деформативній схемі задіяні розкоси. Це пов'язано з тим, що вони пов'язані з стійками болтовими з'єднаннями, які виконують роль плоских шарнірів і не передають згинальні пружні моменти від деформованої стійки на розкіс. Таким чином у загальній (згинальній) формі втрати стійкості беруть участь усі основні пружні елементи конструкції.

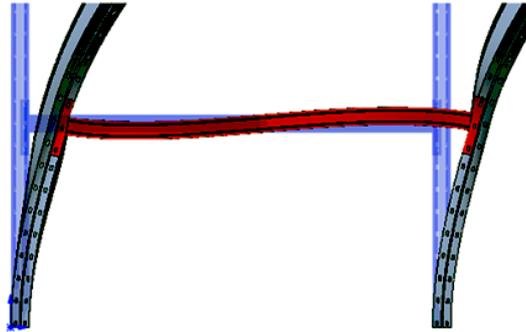


Рис. 3 – . Вигин балки стелажу при загальній формі втрати стійкості

Місцева форма втрати стійкості представлена на рис. 4. У цьому випадку несучу здатність втрачають одна або декілька ділянок основних елементів конструкції. Найчастіше це бувають вертикальні стійки так як вони більше за інші елементи сприймають стискаючі навантаження, які в стелажі можуть досягати значних величин. Однак це не означає, що на цю форму втрати стійкості не впливають інші елементи. В одній і тій самій конструкції стелажу може виникнути як загальна форма втрати стійкості так і місцева. Дослідження показали, що форма втрати стійкості не залежить від величини навантаження на конструкцію. Виникнення тієї чи іншої форми залежить від загальної жорсткості усєї системи. Таким чином, від величини навантаження залежить настання критичної ситуації, а від жорсткості системи вид форми втрати стійкості [1,3].

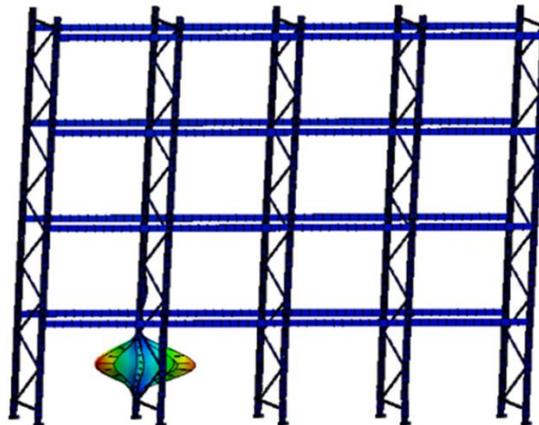


Рис. 4 – Місцева форма втрати стійкості стелажу

Загальна жорсткість стелажної конструкції визначається:

1. топологією системи,
2. характером та особливостями зв'язків що об'єднують складові елементи в єдину пружну конструкцію,
3. жорсткісними параметрами цих елементів.

Як зазначалося вище, перші два напрями розглянуті в роботах [1,3-9]. У цій статті розглянемо третій напрямок. З'ясування ступеня впливу параметрів елементів, що становлять конструкцію, на стійкість всього стелажу проведемо за допомогою аналізу чутливості стелажної конструкції до зміни цих параметрів

Аналіз чутливості конструкцій – це метод, який дозволяє визначити, як зміни у параметрах конструкції (наприклад, геометричні розміри, матеріал, навантаження) впливають на її характеристики, такі як переміщення, напруження, стійкість, власні частоти та інші. Він використовує математичні моделі та чисельні методи, часто базуючись на скінченноелементних методах аналізу складних конструкцій, щоб знайти, які фактори мають найбільше вплив на кінцевий результат. [11,12].

Ступінь впливу на аналізуємий параметр (цільову функцію) оцінюється за допомогою коефіцієнтів чутливості - показників, які демонструють, наскільки сильно змінюється результат будь-якої системи або функції при зміні одного з вхідних параметрів. Для обчислення коефіцієнтів чутливості може бути використаний метод прирощень [13, 14, 15]. Метод прирощень в аналізі чутливості - це метод дослідження, заснований на почерговій зміні одного вхідного параметра при фіксуванні інших та обчисленні збільшення вихідного параметра моделі. Він допомагає зрозуміти, як окремі вхідні змінні впливають на кінцевий результат, та оцінити ступінь залежності вихідних показників від змін у даних, припущеннях чи умовах. Перевага методу прирощень полягає у простоті реалізації та можливості визначення коефіцієнтів чутливості будь-яких вихідних параметрів схеми. За цим методом коефіцієнт чутливості вихідного параметра до зміни i -того вхідного параметра визначається за формулою:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial P_i} \cong \frac{\Delta \varphi}{\Delta P_i} = \frac{\varphi(P_1, P_2, \dots, P_{i-1}, P_i + \Delta P_i, P_{i+1}, \dots, P_m) - \varphi(P_1, P_2, \dots, P_m)}{\Delta P_i} \quad (1)$$

де: φ - вихідний параметр досліджуваної системи (цільова функція); P_i – параметри, що впливають на значення цільової функції; m – кількість параметрів від яких залежить цільова функція.

Для проведення порівняльного аналізу коефіцієнтів чутливості різних елементів в якості параметрів, що змінюються, вибирають величини, віднесені до деяких базових значень. Технологія розрахунків коефіцієнтів чутливості при використанні кінцевих елементів моделей пружних систем досить добре описана в роботах [11,12].

Для розрахунку коефіцієнтів чутливості використовувалася 3D модель стелажу, яка повною мірою враховує всі конструктивні особливості пружної конструкції [1,3]. Вихідним параметром φ служить коефіцієнт запасу стійкості, що характеризує відношення критичного навантаження до робочого (експлуатаційного) навантаження. Вхідними параметрами P_i – жорсткісні властивості основних елементів конструкції стелажу – стійок, балок та розкосів віднесені до початкових значень, які використовуються в початковій моделі стелажу.

Розрахунок жорстких властивостей поперечних перерізів елементів стелажу проводиться щодо осей вигину перерізу. На рис.5 показано орієнтацію стелажу щодо просторової системи координат, яка визначена в нормативних документах [16]. Представлена система координат однозначно визначає осі вигину щодо яких відбувається деформація кожного елемента

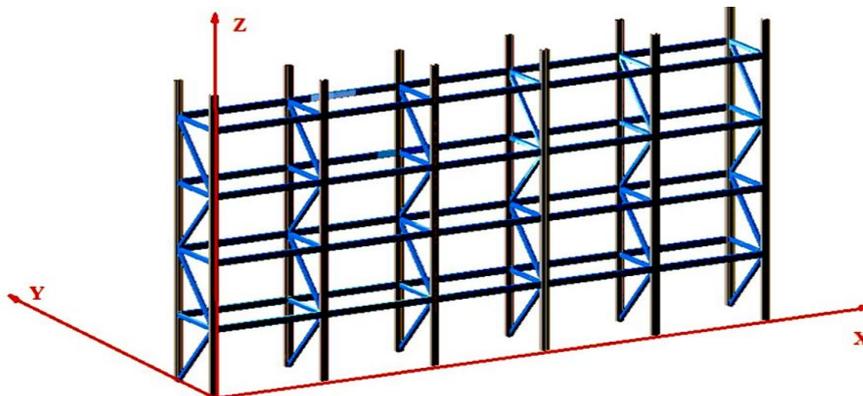


Рис. 5 – Розрахункова система координат.

Розглянемо вплив жорсткості властивостей стійок стелажу на стійкість всієї системи. Із загального виду форм втрати стійкості стелажної конструкції видно, що основні деформації відчувають стійки стелажу. Для загальної форми втрати стійкості (рис 2) стійки зазнають згинальні пружні деформації, при місцевій втраті стійкості – втрату несучої здатності на окремих, як правило, нижніх ділянках (рис. 4). І в першому, і в другому випадках ці види деформації багато в чому визначаються характеристиками поперечного перерізу стійки за її фіксованої довжини.

Сучасні стелажі комплектуються стійками відкритого поперечного перерізу складної конфігурації (рис.6). У процесі формування профіль може отримати до 12 вигинів. Така кількість ребер жорсткості у перерізі робить палетні стелажі надійною конструкцією з високою міцністю та протидарними показниками. підвищує її стійкість при дії вертикальних стискаючих зусиль (рис. 7)



Рис. 6 – Загальний вигляд стійки палетного стелажу [2]

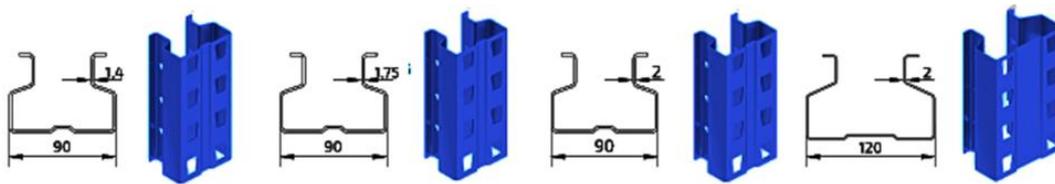


Рис. 7 – Поперечні перетину стійок [2]

На рис. 8 показано поперечного перерізу стійки досліджуваної моделі із зображенням напрямку осей вигину. Жорсткісні властивості перерізу визначаються моментами інерції I_x , I_y при згинанні відносно осей X і Y що проходять через центр вигину перерізу т. O .

Із загальної схеми деформації стелажу при загальній втраті стійкості видно, що згин стійки відбувається відносно осі Y . Тоді в якості першого вхідного параметр для цільової функції φ будемо використовувати осьовий момент інерції поперечного перерізу стійки I_y .

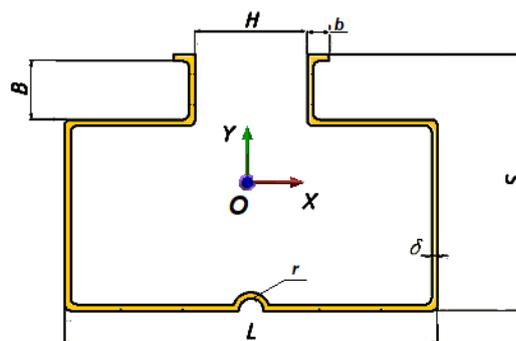


Рис. 8 – Напрямки осей вигину поперечного перерізу стійки

Із загальної схеми деформації стелажу при загальній втраті стійкості видно, що згин стійки відбувається відносно осі Y . Тоді в якості першого входного параметру для цільової функції φ будемо використовувати осьовий момент інерції поперечного перерізу стійки I_y .

Підвищити жорсткі характеристики поперечного перерізу можна за рахунок наступних конструктивних змін:

- підвищення товщини металу, з якого виготовляється стійка (розмір d);
- збільшення ширини L та глибини S перерізу;
- введенням додаткових ребер жорсткості та збільшенням їх розмірів (наприклад, розміри B, b, r).

Треба враховувати, що кожен із цих напрямів пов'язаний не тільки зі збільшенням згинальної жорсткості стійки, але й зі збільшенням її матеріаломісткості, що для сучасних стелажних систем є дуже актуальною проблемою. Наприклад, для стійки на рис. 8 збільшення товщини δ на 25% призводить до збільшення осьового моментів I_y на 18% і водночас до збільшення маси стійки на 20%. Більш ефективним, з погляду матеріаломісткості, є збільшення розміру L . Збільшення ширини стійки на 25% при збереженні решти параметрів перерізу призводить до збільшення осьового моменту I_y на 65%, а маса стійки збільшується всього на 13%.

Даючи збільшення розмірів поперечного перерізу, проведемо для кожного нового поперечного перерізу стійки розрахунок стійкості моделі. За параметр стійки, що варіюється P_1 поставимо відношення поточного значення i -того поперечного перерізу $I_y^{(i)}$ до початкового значення $I_y^{(1)}$. За початкове значення $I_y^{(1)}$ прийнято момент інерції перерізу з розмірами $L=80$ мм, $S=80$ мм, $\delta=1,5$ мм.

$$P_1^{(i)} = \frac{I_y^{(i)}}{I_y^{(1)}}, \quad i=1,2,3 \quad (2)$$

Використовуючи останнє співвідношення для кожного значення $P_1^{(i)}$, що задається, визначається поточне значення моменту інерції стійки $I_y^{(i)}$ і розраховуються розміри цього перерізу (рис.8). Відповідно до нових розмірів поперечного перерізу стійки корегується 3D модель як самої стійки так і всього стелажу та проводиться розрахунок стійкості.

Результати розрахунків представлені у таблиці 1. У першому рядку вказані величини відносного збільшення моменту інерції поперечного перерізу стійки P_1 . У другому рядку – розрахункові значення коефіцієнтів запасу стійкості, що відповідають цим моментам інерції.

Таблиця 1 – Розрахункові значення коефіцієнта запасу стійкості залежно від моменту інерції поперечного перерізу стійки

P_1	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
φ	3,15	3,33	3,49	3,62	3,75	3,86	3,97	4,09	4,19	4,29	4,39

На рис. 9 представлений графік зміни коефіцієнта запасу стійкості від жорсткості стійки стелажу.



Рис. 9 – Залежність цільової функції від жорстких параметрів стійки

З проведених розрахунків випливає:

- залежність носить практично лінійний характер
- збільшення осьового моменту веде до суттєвого збільшення коефіцієнта запасу стійкості.

Лінійний характер залежності дозволяє досить легко визначити коефіцієнт чутливості. На рис. 9 показано графічну інтерпретацію визначення коефіцієнта чутливості. З таблиці 1 для стійки маємо:

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta P_1} \cong 1,1$$

Проведемо оцінку впливу жорстких властивостей балок на стійкість системи.

Балки палетного стелажу мають коробчасте переріз і виготовляються із зварених між собою сталевих С-подібних профілів або інших гнутих тонкостінних профілів різноманітної конфігурації (рис. 10).

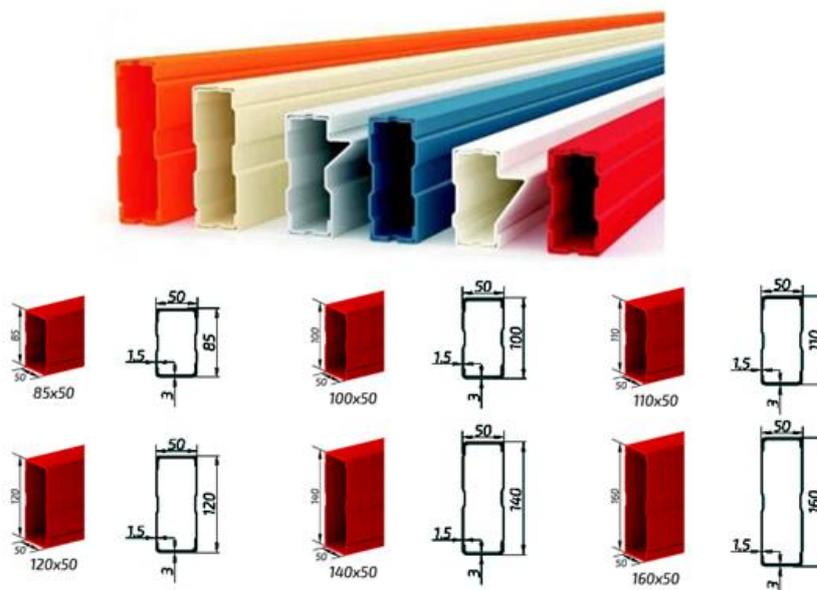


Рис. 10 – Балки сучасного палетного стелажу [2]

При загальній формі втрати стійкості (рис.2) балки відчувають складну форму пружного плоского вигину у вертикальній площині, як показано на рис. 3. Поперечний переріз балки стелажу, що досліджується, представлено на рис. 11.

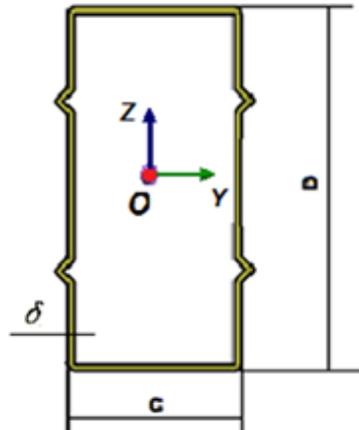


Рис. 11 – Напрямки осей вигину поперечного перерізу балки стелажу

При згинанні балки у вертикальній площині параметром, що визначає жорсткісні властивості балки при її фіксованій довжині, є момент інерції перерізу I_y щодо осі Y . Збільшити цей параметр можна як за рахунок збільшення товщини металу, так і за рахунок збільшення висоти профілю D . Як було показано раніше для стійки, збільшення висоти профілю є більш прийнятним з точки зору металоемності.

Оцінку впливу жорсткості параметрів балки на стійкість всієї системи проведемо аналогічно тому, як це було зроблено для стійки стелажу.

Даючи збільшення розмірів поперечного перерізу, проведемо для кожного нового поперечного перерізу балки розрахунок стійкості всієї моделі.

Для параметра балки, що варіюється P_2 , задамо відношення поточного значення $I_y^{(i)}$ до початкового $I_y^{(1)}$. Початковим прийнято момент інерції $I_y^{(1)}$ перерізу балки з розмірами $D = 80$ мм, $C = 50$ мм, $\delta = 1,5$ мм.

$$P_2^{(i)} = \frac{I_y^{(i)}}{I_y^{(1)}}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

Задаючи значення параметру P_2 , розраховуються поточні моменти інерції перерізу балки. Далі корегується 3D модель стелажу та виконується розрахунок коефіцієнту запасу стійкості φ .

Результати розрахунків представлені у таблиці 2. У першому рядку вказані варіювані величини відносного збільшення моменту інерції поперечного перерізу балки P_2 , у другому рядку – розрахункові значення коефіцієнтів запасу стійкості, що відповідають цим моментам інерції.

Таблиця 2 – Розрахункові значення коефіцієнта запасу стійкості залежно від моменту інерції поперечного перерізу балки

P_2	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
φ	3,15	3,21	3,26	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3

З проведених розрахунків випливає, що зі збільшенням осьового моменту інерції перерізу балки коефіцієнт запасу стійкості спочатку зростає за лінійним законом. Потім, починаючи зі

значення $P_2 = 1,3$ залишається постійним. Такий характер зміни цільової функції обумовлений тим, що до значення цільової функції $\varphi = 3,3$ стелаж відчуває згинальну (загальну форму) втрати стійкості (рис. 2). Цей етап характерний тим, що збільшення згинальної жорсткості балок веде до збільшення загальної жорсткості металоконструкції, а отже, і підвищення коефіцієнта запасу стійкості. Починаючи зі значення осьового моменту опору поперечного перерізу стійки, який на 30% перевищує початкове значення ($P_2 = 1,3$), жорсткість стелажу досягає такої величини, що форма втрати стійкості переходить з загальної (згинальної) в місцеву форму втрати стійкості (рис. 4). Ця форма характерна втратою несучої здатності окремих ділянок стійок та властивості балок у явному вигляді не впливають на цей стан стелажу.

Лінійний характер залежності на першому інтервалі зміни вхідного параметра дозволяє визначити коефіцієнт чутливості. З таблиці 2 для загальної форми втрати стійкості маємо:

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta P_2} \cong 0,5$$

Для ділянки, що відповідає місцевій формі втрати стійкості, коефіцієнт чутливості дорівнює 0

Розглянемо вплив жорсткості властивостей розкосів на стійкість конструкції стелажу.

Розкоси – це металеві профілі (горизонтальні та діагональні), які з'єднують вертикальні стійки рами стелажу. Вони утворюють трикутні структури всередині рами, які протистоять бічним (горизонтальним) навантаженням і запобігають деформації або перекиданню всієї конструкції.

Зазвичай в рамах використовуються горизонтальні та діагональні розкоси, що монтуються у певній послідовності згідно зі схемою складання [16]. Розкоси виготовляються із міцного металевого гнучого профілю товщиною 1,5 – 2 мм. і надійно кріпляться до стійок за допомогою болтових з'єднань, що забезпечує міцне та довговічне з'єднання як показано на рис. 12. У сучасних палетних стелажих розкоси є частиною збірно-розбірної конструкції, що дозволяє легко монтувати, демонтувати чи модифікувати стелажну систему.



Рис. 12 – Розкоси стелажу

У стелажі, що розглядається, використовуються коробчасті розкоси квадратного поперечного перерізу. Поперечний переріз розкосу та напрями осей вигину показано на рис. 13.

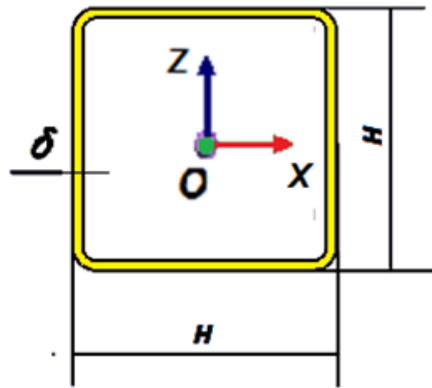


Рис. 13 – Поперечний переріз та напрямки осей вигину розкосу

Осьові моменти інерції квадратного поперечного перерізу однакові. Тому в якості параметра P_3 , що варіюється (за аналогією зі стійками та балками) поставимо відношення поточного значення одного з осьових моментів, наприклад, $I_z^{(i)}$, до його початкового значення. Як початковий прийнятий момент інерції $I_z^{(1)}$ перерізу розкосу з розмірами $H=40\text{мм}$, $\delta = 1,5\text{мм}$.

Результати розрахунків представлені у таблиці 3. У першому рядку вказані величини P_3 відносного збільшення моменту інерції поперечного перерізу розкосу. У другому рядку – розрахункові значення коефіцієнтів запасу стійкості всього стелажу φ , що відповідають цим моментам інерції поперечного перерізу розкосу.

Таблиця 3 – Розрахункові значення коефіцієнта запасу стійкості залежно від моменту інерції поперечного перерізу розкосу

P_3	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
φ	3,15	3,15	3,15	3,16	3,16	3,16	3,16	3,17	3,17	3,17	3,17

З даних цієї таблиці ми бачимо, що збільшення жорсткості розкосів незначно впливає на стійкість всієї системи. Це пояснюється двома чинниками:

- розкоси дають значну жорсткість конструкції у напрямку перпендикулярному напрямку деформації при втраті стійкості всього стелажу.
- болтові з'єднання, якими розкоси приєднані до стійок, практично виключають передачу згинальних деформацій стійок на розкоси. Тому розкоси не беруть участь у схемі пружної деформації конструкції при втраті стійкості.

За наведеними у табл. 3 даним визначимо коефіцієнт чутливості для розкосів:

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta P_3} \cong 0,1$$

З отриманого значення чутливості бачимо що властивості розкосів надають незначний вплив на стійкість всієї системи в порівнянні з іншими елементами конструкції.

Для наочності аналізу чутливості на рис. 14 показані графіки зміни коефіцієнта стійкості при зміні параметрів стійки (крива 1), балки (крива 2) та розкосів (крива 3). Представлені криві наочно показують вплив жорстких параметрів складових пружних елементів на стійкість усєї системи. Ступінь такого впливу показують коефіцієнти чутливості що розраховані для стійки, балки та розкосу, які представлені в таблиці 4.



Рис. 14 – Залежність коефіцієнта запасу стійкості від жорстких властивостей елементів стелажу

Таблиця 4 – Розрахункові значення коефіцієнтів чутливості стійкості стелажу від зміни параметрів пружних елементів

Пружний елемент	Стійка	Балка	Розкіс
Коефіцієнт чутливості	1,1	0,5	0,1

Висновки. Найбільший вплив на стійкість стелажної системи мають параметри стійки. Їх збільшення (наприклад збільшення ширини стійки) може суттєво підвищити стійкість усієї системи. Другим за впливом є балка стелажу. Збільшуючи жорсткість балки при згинанні у вертикальній площині можна не тільки підвищувати стійкість системи, але й керувати формою втрати стійкості, переводячи загальну форму в місцеву та навпаки. Домагатися збільшення жорсткості балки можна не тільки за рахунок збільшення висоти профілю поперечного перерізу (що безсумнівно веде до збільшення металоємності стелажу), але і за рахунок широкого використання нетрадиційних профілів, таких як «Z» чи «S» профілів. Такі профілі при тих же витратах матеріалу мають значну жорсткість у порівнянні з традиційними коробчастими перерізами. Найменший вплив на стійкість надають розкоси. Їх жорсткі властивості мало позначаються на стійкості системи.

Список літератури:

1. Резніченко О. І., Рубашка В. П. Побудова розрахункової схеми аналізу стійкості розбірних палетних стелажів. *Машинобудування*, вип. 30 (Квітень), 2023. С. 29-42.
2. ФОРСТОР. Палетні стелажі: [Електронний ресурс]// URL: https://forstor.ua/ua/castellazhi/palletnye/?gad_source=1&gad_campaignid=14789128015&gbraid=0AAAAAD1IYAUYDFUoqHMJCoVYfkC5Ir2p2&gclid=CjwKCAiA8vXIBhAtEiwAf3B-g6CLCxq0EBBhCf1r75pm6KtkSZ30B-hRsSg_CDALe9JfG7pWUxThqBoC_P0QAvD_BwE/.
3. Kovalenko, V., Rubashka, V., Alieksieiev, V., Heiden, B. (2023). Stability Analysis of Dismountable Pallet Racks. In: Ciobață, D.D. (eds) *International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2023. ICoRSE 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 762. Springer, Cham.
4. Liu, S.W.; Pekoz, T.; Gao, W.L.; Ziemian, R.D.; Crews, J. Frame analysis and design of industrial rack structures with perforated cold-formed steel columns. *Thin-Walled Struct.* 2021, 163, 107755.
5. Gonçalves, R.; Camotim, D.; Basaglia, C.; Martins, A.D.; Peres, N. Latest developments on the analysis of thin-walled structures using Generalised Beam Theory (GBT). *J. Constr. Steel Res.* 2023, 204, 107858.

6. Рубашка В.П. Стійкість металокопструкції рами палетного стеллажу // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук.пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2024. 2(10),2024. – С. 32–41. – ISSN 2079-004X, ISSN 2786-7587, DOI: 10.20998/2079-004X.2024.2(10).04.
7. Лук'янченко О. О Комп'ютерне моделювання в задачах стійкості тонкостінних стержнів відкритого профілю з недоскональностями форми/ О. О. Лук'янченко, І. О. Охтен // Управління розвитком складних систем. - Київ, 2021. - № 47. - С. 95 – 101.
8. Reznichenko O.I., Rubashka V.P. Calculation scheme for research of stability of collapsible racks. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXXI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2022, 17-20 травня 2023 р. / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ «ХПІ». – с. 199.
9. Рубашка В.П., Кузьміна К.Ю., Кузнецов О.Е Аналіз жорсткості кронштейну палетного стеллажу. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXX міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2022, 19-21 жовтня 2022 р. / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ «ХПІ», 134.
10. Рубашка В.П. Стійкість металокопструкції рами палетного стеллажу // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук.пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2024. 2(10),2024. – С. 32–41. – ISSN 2079-004X, ISSN 2786-7587, DOI: 10.20998/2079-004X.2024.2(10).04.
11. Дзюба, А. П., Дзюба, О. А., & Сіренко, В. М. (2025). Дослідження чутливості результатів розрахунку міцності елементів копструкцій до варіювання вхідних даних. Проблеми обчислювальної механіки і міцності копструкцій, 1(39), 15-25. <https://doi.org/10.15421/4225102>.
12. Olhoff, N., Lund, E. (1995). Finite Element Based Engineering Design Sensitivity Analysis and Optimization. In: Herskovits, J. (eds) Advances in Structural Optimization. Solid Mechanics and Its Applications, vol 25. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0453-1_1.
13. Murray-Smith D. J. Methods and applications of parameter sensitivity analysis. Modelling and Simulation of Integrated Systems in Engineering. 2012. P. 129—163. URL: <https://doi.org/10.1533/9780857096050.129>.
14. Murray-Smith D. J. The application of parameter sensitivity analysis methods to inverse simulation models. Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems. 2013. P. 67-90. URL: <https://DOI:10.1080/13873954.2012.696271>.
15. Gengjian Qian, Michel Massenzio, Denis Brizard, Mohamed Ichchou. Sensitivity analysis of complex engineering systems: Approaches study and their application to vehicle restraint system crash simulation. Reliability Engineering and System Safety, 2019, 187, pp. 110-118. [ff10.1016/j.res.2018.07.027](https://doi.org/10.1016/j.res.2018.07.027). [ffhal-01908980v2f](https://doi.org/10.1016/j.res.2018.07.027).
16. ДСТУ EN 15512:2015. Системи складські стаціонарні сталеві. Збірно-розбірні палетні стелажні системи. Принципи проектування копструкцій.

References (transliterated):

1. Reznichenko O, I., Rubashka V.P. Pobudova rozrakhunkovoi skhemy analizu stiikosti rozbirnykh paletnykh stelazhiv. Mashynobuduvannia, vyp. 30 (Kviten), 2023. S. 29-42
2. FORSTOR. Paletni stelazhi: [Elektronnyi resurs]// URL: https://forstor.ua/ua/ca-stellazhi/paletnye/?gad_source=1&gad_campaignid=14789128015&gbraid=0AAAAAD11YAUYDFUoqHMJCoVYfkC5Ir2p2&gclid=CjwKCAiA8vXIBhAtEiwAf3B-g6CLCхq0EBBhCf1r75pm6KtkSZ30B-hRsSg_CDALE9JfG7pWUxThqBoC_POQAvD_BwE/
3. Kovalenko, V., Rubashka, V., Aliksieiev, V., Heiden, B. (2023). Stability Analysis of Dismountable Pallet Racks. In: Cioboată, D.D. (eds) International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2023. ICoRSE 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 762. Springer, Cham.
4. Liu, S.W.; Pekoz, T.; Gao, W.L.; Ziemian, R.D.; Crews, J. Frame analysis and design of industrial rack structures with perforated cold-formed steel columns. Thin-Walled Struct. 2021, 163, 107755.
5. Gonçalves, R.; Camotim, D.; Basaglia, C.; Martins, A.D.; Peres, N. Latest developments on the analysis of thin-walled structures using Generalised Beam Theory (GBT). J. Constr. Steel Res. 2023, 204, 107858.
6. Rubashka V.P. Stiikist metalokonstruktсии ramy paletnoho stellazhu // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriiia: Tekhnolohii v mashynobuduvanni = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук.пр. / Nats. tekhn. un-t «Kharkiv. politekhn. in-t». – Kharkiv : NTU «KhPI», 2024. 2(10),2024. – S. 32–41. – ISSN 2079-004Kh, ISSN 2786-7587, DOI: 10.20998/2079-004X.2024.2(10).04
7. Luk'ianchenko O. O Komp'iterne modeliuvannia v zadachakh stiikosti tonkostinnykh sterzhniv vidkrytoho profilu z nedoskonalostiamy formy/ O. O. Luk'ianchenko, I. O. Okhten // Upravlinnia rozvytkom skladnykh system. - Kyiv, 2021. - № 47. - S. 95 – 101.

8. Reznichenko O.I., Rubashka V.P. Calculation scheme for research of stability of collapsible racks. Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorov'ia: tezy dopovidei KhXKhI mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii MicroCAD-2022, 17-20 travnia 2023 r. / za red. prof. Sokola Ye.I. – Kharkiv: NTU «KhPI». – s. 199.
9. Rubashka V.P., Kuzmina K.Yu., Kuznetsov O.E Analiz zhorstkosti kronshteinu paletnoho stelazhu. Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorov'ia: tezy dopovidei KhXKhI mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii MicroCAD-2022, 19-21 zhovtnia 2022 r. / za red. prof. Sokola Ye.I. – Kharkiv: NTU «KhPI», 134.
10. Rubashka V.P. Stiikist metalokonstruktsii ramy paletnoho stellazhu // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Tekhnolohii v mashynobuduvanni = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: zb. nauk.pr. / Nats. tekhn. un-t «Kharkiv. politekhn. in-t». – Kharkiv : NTU «KhPI», 2024. 2(10),2024. – S. 32–41. – ISSN 2079-004Kh, ISSN 2786-7587, DOI: 10.20998/2079-004X.2024.2(10).04
11. Dziuba, A. P., Dziuba, O. A., & Sirenko, V. M. (2025). Doslidzhennia chutlyvosti rezultativ rozrakhunku mitsnosti elementiv konstruktsii do variuvannya vkhidnykh danykh. Problemy obchysluvalnoi mekhaniky i mitsnosti konstruktsii, 1(39), 15-25. <https://doi.org/10.15421/4225102>
12. Olhoff, N., Lund, E. (1995). Finite Element Based Engineering Design Sensitivity Analysis and Optimization. In: Herskovits, J. (eds) Advances in Structural Optimization. Solid Mechanics and Its Applications, vol 25. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0453-1_1
13. Murray-Smith D. J. Methods and applications of parameter sensitivity analysis. Modelling and Simulation of Integrated Systems in Engineering. 2012. P. 129—163. URL: <https://doi.org/10.1533/9780857096050.129>
14. Murray-Smith D. J. The application of parameter sensitivity analysis methods to inverse simulation models. Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems. 2013. P. 67-90. URL: <https://DOI:10.1080/13873954.2012.696271>
15. Gengjian Qian, Michel Massenzio, Denis Brizard, Mohamed Ichchou. Sensitivity analysis of complex engineering systems: Approaches study and their application to vehicle restraint system crash simulation. Reliability Engineering and System Safety, 2019, 187, pp. 110-118. [ff10.1016/j.res.2018.07.027](https://doi.org/10.1016/j.res.2018.07.027). [ffhal-01908980v2f](https://doi.org/10.1016/j.res.2018.07.027)
16. DSTU EN 15512:2015. Systemy skladski stacionarni stalevi. Zbirno-rozbirni paletni stelazhni systemy. Pryntsyropy proektuvannya konstruktsii.

Надійшла (received) 04.11.2025 р

Відомості про авторів / About the Authors

Гнатенко Григорій Олександрович (Gnatenko Grygoriy) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри підйомно-транспортних машин та обладнання, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5450-375X>; e-mail: Grygoriy.Gnatenko@khi.edu.ua

Коваленко Валентин Олександрович (Kovalenko Valentyn) – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", завідувач кафедри підйомно-транспортних машин та обладнання, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9161-198X>; e-mail: valentyn.kovalenko@khi.edu.ua

Рубашка Володимир Петрович (Rubashka Volodymyr) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри підйомно-транспортних машин та обладнання, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9856-3850>; e-mail: volodymyr.rubashka@khi.edu.ua

Стрижак Всеволод Вікторович (Stryzhak Vsevolod) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри підйомно-транспортних машин та обладнання, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3032-6004>; e-mail: vsevolod.stryzhak@khi.edu.ua

Турчин Ольга Володимирівна (Turchyn Olha) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут”, доцент кафедри підйомно-транспортних машин та обладнання, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9153-3704>; e-mail: olha.turchyn@khi.edu.ua