

DOI 10.32820/2079-1747-2022-30-29-41  
УДК 658(045)

## **ПОБУДОВА РОЗРАХУНКОВОЇ СХЕМИ АНАЛІЗУ СТІЙКОСТІ РОЗБІРНИХ ПАЛЕТНИХ СТЕЛАЖІВ**

**© Резніченко О.І., Рубашка В.П.**

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»*

### **Інформація про авторів:**

**Резніченко Олексій Іванович**; reznichenko.aleksey@gmail.com; студент кафедри Підйомно-транспортних машин і обладнання; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

**Рубашка Володимир Петрович**: ORCID: 0000-0002-9856-3850; viraakriv@gmail.com; кандидат технічних наук; доцент кафедри Підйомно-транспортних машин і обладнання; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

Стаття присвячена розвитку методів аналізу стійкості розбірних палетних стелажів. Ці конструкції оптимально пристосовані до мінімально можливого розміру займаної ними корисної площі приміщення, а також забезпечення зручного доступу до товарів, що зберігаються. Необхідність розміщення максимального числа вантажів на мінімальній складській території висуває високі вимоги до методів проектування та розрахунку стелажних систем.

Як метод дослідження пропонується скінчено-елементний підхід, що дозволяє повною мірою врахувати всі конструктивні особливості складових елементів та характер їх з'єднання у розбірній структурі.

Метою роботи є розробка розрахункової схеми секції палетного збірно-розбірного стелажу для аналізу стійкості, що враховує конструктивні особливості складових елементів стелажу та особливостей роз'ємних з'єднань пружних елементів. Крім цього, скінчено-елементна модель стелажу повинна мати таку розмірність, яка з одного боку забезпечить прийнятну точність розрахунків, а з іншого - дозволить її використовувати як вихідну для побудови моделей багатосекційних стелажів і не вимагатиме під час проведення розрахунків значних комп'ютерних ресурсів обчислювальної системи. .

На основі порівняння стійкості побудованих точної оболонкової моделі секції палетного стелажу та спрощеної комбінованої моделі доведено ефективність використання запропонованої системи спрощень. В результаті побудовано спрощену розрахункову схему секції стелажу, яка може бути використана для побудови розрахункових схем багатосекційних конструкцій.

**Ключові слова:** палетний стелаж, перфорована оболонка, розрахункова схема, стійкість, метод скінченних елементів, комп'ютерне моделювання.

**Reznichenko O. I., Rubashka V. P.** “Construction of a calculation scheme for analyzing the stability of collapsible pallet racks”.

This article is devoted to the development of methods for analyzing the stability of collapsible pallet racks. These structures are optimally adapted to the minimum possible size of the useful area of the room occupied by them, as well as providing convenient access to stored goods. The need to place the maximum number of goods in the minimum warehouse area increases the demand for the methods of design and calculation of shelving systems.

As a research method, a finite element approach is proposed, which allows taking into account all the design features of the constituent elements and the nature of their connections in a collapsible structure.

The purpose of the work is to develop a design scheme of a pallet collapsible rack section for stability analysis, taking into account the design features of the components of the rack and the features of the detachable joints of the components of the elastic elements. In addition, the finite element model of the rack must have such a dimension that, on the one hand, will ensure acceptable accuracy of calculations, and, on the other hand, will allow it to be used as a starting point for building models of multi-section racks and will not require significant computer resources of the computing system during calculations.

Based on a comparison of the stability of the constructed exact shell model of the pallet rack section and the simplified combined model, the effectiveness of using the proposed system of simplifications is proved. As a result, a simplified design scheme of the rack section has been constructed, which can be used for building design schemes of multi-section structures.

**Keywords:** pallet rack, perforated shell, calculation scheme, stability, finite element method, computer modeling.

### **Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями**

Найбільш поширеним способом зберігання великих обсягів промислових вантажів є їх складування в рядних палетних стелажах. Вантаж при цьому укладають на піддони (палети) двох основних типорозмірів – EUR (800x1200x150 мм, європіддон) та FIN (1000x1200x150 мм, фінський піддон). Подібним способом можна зберігати і важкі штучні вантажі.

На палетних стелажах можливе зберігання вантажів у два, три і більше рівнів (до восьми), включаючи рівень підлоги. Їх застосування дозволяє суттєво скоротити витрати на зберігання одиниці продукції, ефективно використовуючи корисну площу складу (коефіцієнт використання площі складу за умови його правильного проектування може досягати 0,6).

Конструкція стелажів дозволяє встановлювати одинарні та здвоєні ряди, довжина яких обмежується лише зручністю обслуговування вантажною технікою. До недавнього часу використовувалися стелажі цільнозварні або стелажі зі звареними рамами та складанням на болтах, а їх елементами служив звичайний будівельний сортамент металопрокату. Ці стелажі відрізняються винятковою міцністю та надійністю, економією на матеріалі до 50 % від вартості готового розбірного стелажа, що легко компенсується при його монтажі. Фактично такі стелажі слід збирати раз і назавжди, але подібне обладнання не відповідає сучасним вимогам споживача.

Сучасні стелажі обов'язково мають бути швидкорозбірними, складатися зі збірних рам та легкого прокату спеціального виду. Для їхнього виробництва зазвичай застосовують спеціальне прокатне обладнання. Стійка сучасного стелажа виконується з металу завтовшки 1,5...2 мм, а різні параметри вантажопідйомності рівнів стелажу забезпечуються відповідно балками спеціальної форми, які виготовляють на прокатному устаткуванні.

Збірно-розбірний стелаж складається з наступних елементів (рис. 1):

- кількох рам кожна з яких має дві вертикальні стійки спеціального профілю з перфорацією, з'єднаних між собою розкосами, що підвищують жорсткість конструкції ;
- горизонтальні вантажні балки з елементами кріплення до вертикальних рам які виконані у вигляді кронштейнів з зачепами, привареними до кінців балок;
- під'ятників, розташованих унизу кожної стійки.

Профіль стійки має складну конструкцію, що має у своєму перерізі до 12 ребер жорсткості. Приклад фрагмента стійки та різних видів поперечних перерізів представлений на рис. 2.

Вантажні балки та розкоси являють собою тонкостінні оболонкові конструкції закритого профілю. Балки кріпляться до стійок стелажу за допомогою кронштейнів. Конструкція кронштейна передбачає наявність кількох зачепів, за допомогою яких балка з'єднується зі стійкою стелажу (рис. 3). Розкоси мають на кінцях круглі отвори для кріплення до стійок.

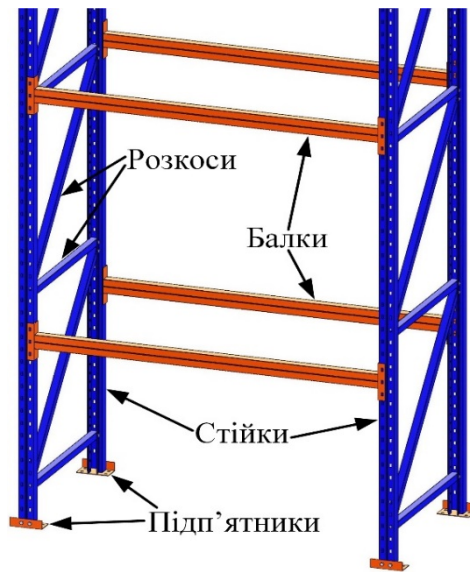


Рис. 1 – Збірно-розбірний палетний стелаж

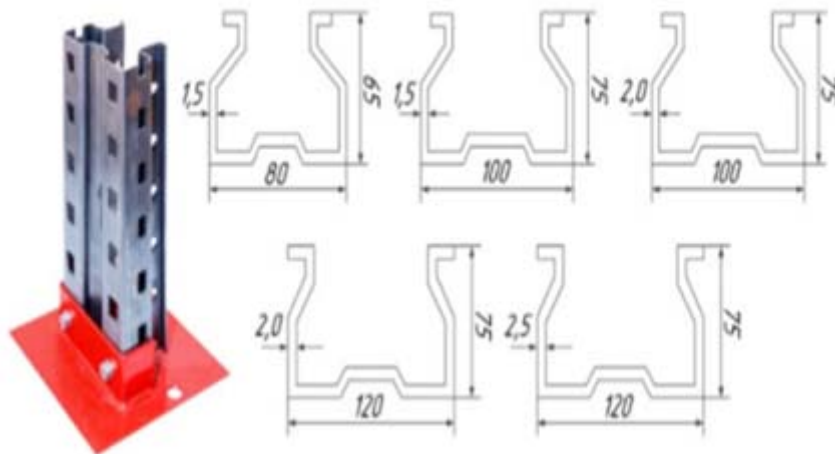


Рис. 2 – Стійка стелажу

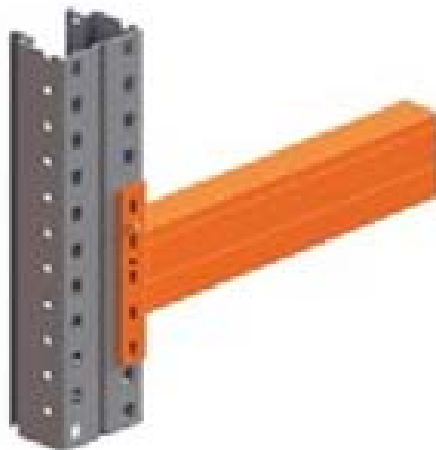


Рис. 3 – Балка із кронштейном

Як видно з наведеного опису сучасні палетні стелажі є складними просторовими металевими конструкціями, що складаються з різноманітних пружних оболонкових елементів і знаходяться під впливом просторової системи сил. Оскільки стелажи схильні до значних вертикальних навантажень, особливої актуальності набувають питання забезпечення стійкості як складових елементів, так і всієї конструкції в цілому.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Наукових досліджень, присвячених аналізу стійкості стелажних конструкцій нині практично немає. При розрахунках використовується методика, викладена нормативних документах, прийнятих нашої країні [1-3]. Однак ця методика не дає відповіді на найважливіші питання вдосконалення конструкції під час проектування стелажних систем.

Основу стелажної конструкції складають елементи з тонкостінних перфорованих профілів. Аналіз напружено-деформованого стану та стійкості таких конструкцій значно ускладнений і традиційними аналітичними методами практично неможливий. Тому дослідження обмежуються зазвичай аналізом окремих елементів, що становлять основу стелажних конструкцій.

Основний напрямок досліджень присвячено дослідженню стійкості найскладнішого елемента конструкції стелажу – опорної стійки. Можна виділити два напрями досліджень залежно від виду моделі, яка застосовується для аналізу стійкості.

Перший напрямок пов'язаний з поданням стійки тонкостінним стрижневим елементом відкритого поперечного перерізу. Стійкість таких стрижнів нині є класичним завданням [4, 5]. Але практичне використання таких стрижнів веде до виявлення нових особливостей, які необхідно враховувати в розрахунках. Наприклад, у роботах [6,7] розглянуто питання стійкості стрижнів відкритого профілю з урахуванням геометричних недосконалостей. Робота [8] присвячена аналізу поведінки тонкостінних стрижнів відкритого профілю у вузлах їхнього з'єднання. Автором запропоновано метод формування спеціальних типових матриць жорсткості для різних видів вузлових з'єднань, що має служити основою побудови моделі всієї металоконструкції.

Аналіз сучасних робіт показує, що уявлення опорної стійки стелажу тонкостінним стрижневим елементом дозволяє врахувати особливості стійкості елементів із незамкненим поперечним перерізом. Однак залишається відкритим питання про врахування перфораційних отворів, які використовуються для з'єднання стійки з іншими елементами стелажу – розкосами та вантажними балками.

Тому активно розвивається другий напрямок, який заснований на поданні стійки стелажу тонкостінною оболонкою з перфораційними отворами. У роботах [9,10] на основі великої кількості експериментальних досліджень оцінено вплив круглих, а в монографії [11] круглих та прямокутних отворів на стійкість оболонки. Авторами визначено явну залежність критичного навантаження, що викликає втрату стійкості, від форми та кількості отворів. Такого висновку приходиться автор роботи [12]. На основі теоретичних досліджень сильно перфорованих оболонок їм було отримано коефіцієнти зниження жорсткості, спричиненої перфорацією. В результаті визначено значення критичних тисків та відповідні їм форми втрати стійкості залежно від довжини оболонки та ступеня перфорації.

З проведеного аналізу сучасних робіт із стійкості оболонок випливає, що перфораційні отвори, що є характерною особливістю конструкції стійки стелажу, істотно впливають на стійкість цього елемента. Тому для побудови коректної моделі стелажу необхідне переставлення стійок у вигляді тонкостінних перфорованих оболонок. Така модель автоматично забезпечить облік ефекту відкритого поперечного перерізу стійки. Це ж стосується і таких важливих елементів конструкції як кронштейни та підп'ятники стелажу. Для моделювання інших елементів металоконструкції стелажу можуть бути використані стрижневі елементи.

Слід зазначити, що наведені роботи присвячені дослідженню стійкості окремих елементів металоконструкції стелажу. У той же час практично немає робіт, присвячених аналізу стійкості всієї конструкції збірно-розбірною стелажу з урахуванням конструктивних особливостей кожного елемента та специфіки зав'язків між ними. Враховуючи складність такої задачі, методом її вирішення пропонується метод чисельного моделювання стійкості на основі скінчено-елементних розрахункових схем, який знайшов широке застосування у вирішенні різноманітних задач, у тому числі й при аналізі стійкості пружних систем [13-15].

### **Мета роботи**

Розробити розрахункову схему секції палетного збірно-розбірною стелажу для аналізу стійкості, що враховує:

- конструктивні особливості складових елементів стелажу;
- особливостей роз'ємних з'єднань стійок, розкосів, балок

Крім цього, скінчено-елементна модель секції стелажу повинна мати таку розмірність, яка з одного боку забезпечить прийнятну точність розрахунків, а з іншого боку - дозволить її використовувати як вихідну для побудови моделей багатосекційних стелажів і не вимагатиме при проведенні розрахунків значних комп'ютерних ресурсів обчислювальної системи.

### **Виклад основного матеріалу дослідження**

Конструкція палетного стелажу має низку особливостей, які істотно впливають на технологію проектування та розрахунок таких систем.

По-перше, всі елементи стелажної системи виконані з тонкостінного гнутого профілю. Товщини становлять 1,5 – 2,5 мм. Особливу складність викликають стійки стелажу, оскільки вони виконані з гнутого тонкостінного відкритого профілю. Балки та розкоси зазвичай виконуються з гнутих тонкостінних профілів замкнутого поперечного перерізу.

По-друге, такі стелажи є збірно-розбірними. Отже, всі елементи пов'язані один з одним роз'ємними видами зв'язків - болтові з'єднання, з'єднання типу «зачіп» та ін.

По-третє, стелажи мають значну висоту (до 30 м) і довжина по фронту визначається розмірами складу і може досягати значних величин по фронту від 10м до 40 м. У той же час такі конструкції повинні витримувати значні навантаження. Усі ці особливості значно ускладнюють розрахунок.

Відповідно до нормативних документів [1-3] особлива увага приділяється розрахункам на стійкість, оскільки високі тонкостінні конструкції стелажів знаходяться під впливом значних вертикальних навантажень. У ДСТУ EN 15512:2015 передбачено стрижневу (балочну модель) стелажу [2]. Хоча не забороняється використання комп'ютерних методів та використання інших видів моделей. У свою чергу застосування стрижневої (балочної) моделі вимагає обґрунтування побудови балочних моделей основних складових металоконструкції стелажу – балки (траверси) з кронштейном, розкосів та стійок, підп'ятників.

Вантажні балки і розкоси є коробчастими тонкостінними елементами замкнутого постійного по довжині перерізу. Тому вони повністю підходять під поняття балка, кронштейни та підп'ятники моделюється елементом з кутовими жорсткостями. Але зі стійками справа значно складніша.

Стілка див. рис. 2 являє собою перфоровану тонкостінну оболонку складної форми. Стілка є центральним елементом стелажу що пов'язує всі основні елементи в єдину конструкцію. Стілки сприймають навантаження та через них навантаження передається на основу. Цим визначається конструкція стійки. Перфораційні отвори призначені для з'єднання кронштейна балки та розкосів. Така конструкція стійки ускладнює її уявлення балочним елементом або робить це уявлення неможливим, а необхідність обліку перфораційних отворів значно змінюють (зменшують) жорсткі параметри всієї стійки в цілому,

Збірно-розбірний характер конструкції викликає необхідність урахування конструктивних особливостей сполучних елементів:

- кронштейни, які за допомогою зачепів з'єднують балки стелажу зі стійками,
- болтові з'єднання, за допомогою яких розкоси пов'язують стійки в рамі стелажу.

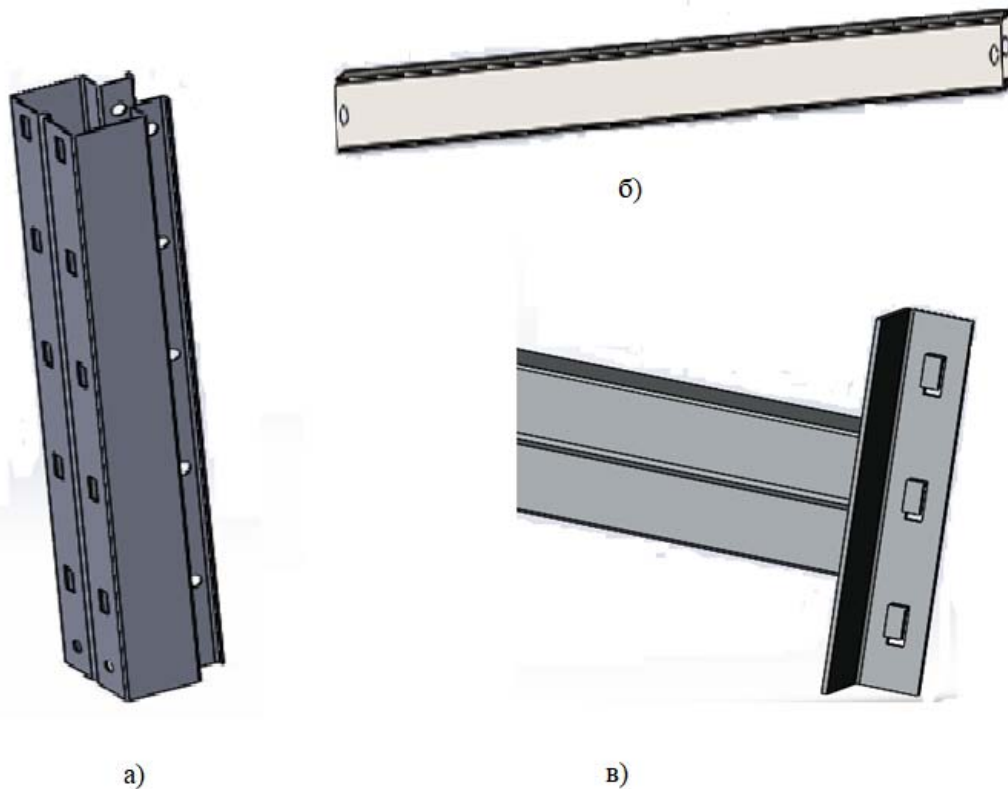
Тому пропонується побудувати модель секції стелажу, де буде використана комбінована розрахункова схема в якій вантажні балки та розкоси мають бути представлені балочними моделями, стійки, кронштейни – пружними оболонками, кріпильні деталі – тривимірними тілами

Сучасні САПР дають можливість будувати геометричні моделі та розраховувати найскладніші конструкції. Моделювання стелажної конструкції виконуватимемо в САПР SOLIDWORKS. Ця система має найширші можливості геометричного моделювання різних конструкцій, врахуванню їх особливостей і різноманітності з'єднань. Крім цього, у цій системі передбачено можливість проведення різноманітних розрахунків, у тому числі розрахунків стійкості.

Як приклад, задавалася секція стелажу з наступними параметрами:

Висота стелажу 6 м, стелаж має 5 ярусів (включаючи підлогу). Глибина стелажу 1 м. Висота ярусу 1,1 м. У осередку може розташовуватися два європіддони з вантажем 500 кг на кожному піддоні. Розміри стойки 80x80. Балки – 50x90, довжина 1800 мм (під два європіддони). Розкіс – елемент прямокутного перерізу зі стороною 40 мм. Товщина металу усіх елементів 1,5мм. Кріпильні вироби – болти М10x55, гайки М10

На рис. 4 представлено розроблені 3-D моделі опорної стійки, балки з кронштейном та розкоси палетного стелажу.



**Рис. 4** – 3-D моделі елементів стелажу. а) – стійка; б) – розкіс; в) – балка з кронштейном

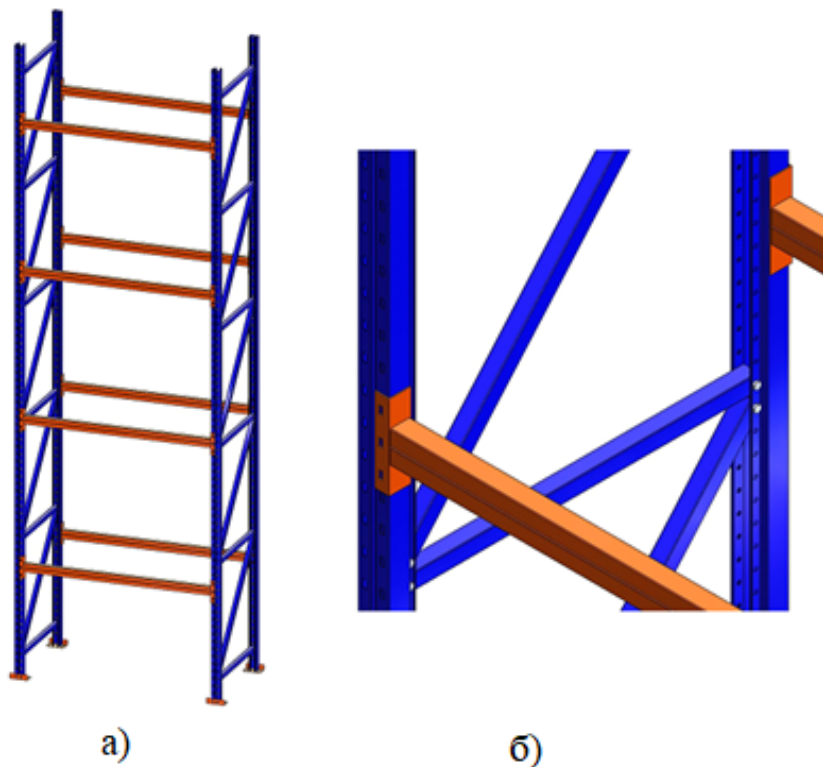
Як видно з наведеного малюнка, модель стійки являє собою довгу тонкостінну оболонку складного поперечного перерізу розімкнутого профілю. На фронтальній грані по всій висоті стійки передбачено ребро жорсткості, що підвищує її жорсткість, а також прямокутні перфораційні отвори для її з'єднання з вантажними балками стелажу за допомогою зачепів кронштейнів. На тильній стороні оболонки передбачено кілька ребер жорсткості, а також круглі перфораційні отвори для з'єднання стійки з розкосами за допомогою болтових з'єднань. У перерізі з тильного боку також передбачений роз'єм, до якого заводиться розкіс при з'єднанні стійок в єдину раму стелажу.

Розкіс являє собою подовжену тонкостінну оболонку постійного квадратного поперечного перерізу. На кінцях розкосу передбачені отвори для болтових з'єднань розкісу зі стійкою.

Балка моделюється замкнутою тонкостінною оболонкою з ребром жорсткості посередині. На кінці прикріплений кронштейн який є кутовою оболонкою з видавленими на одній зі сторін зачепами. За допомогою цих зачепів балка прикріплюється до сусідніх стояків стелажу.

Крім цього, при моделюванні секції стелажу використовувалися 3-D моделі кріпильних деталей – болтів та гайок, які використовувалися при моделюванні болтових з'єднань розкосів зі стійками рами. Таким чином, розроблена 3-D модель повністю підготовлена для реалізації всіх видів роз'ємних з'єднань, які використовуються в збірно-розбірних палетних стелажах.

3-D модель секції стелажу представлена на рис. 5. Вона складається із 2-х рам, пов'язаних між собою за допомогою кронштейнів з вантажними балками. У середині кожної рами стійки з'єднуються горизонтальними та кутовими розкосами. Кінці розкосів заведені у прорізи стійок і зафіксовані болтовими з'єднаннями. Моделювання роз'ємних з'єднань показано на рис. 3.5.



**Рис. 5** – Модель секції стелажу. а) загальний вигляд секції стелажу; б) моделювання болтових з'єднань та з'єднань «зачепом»

У результаті отримано 3-D модель секції стелажу, яка максимально відповідає реальній конструкції.

На основі побудованої моделі стелажу у додатку SOLIDWORKS SYMULATION побудовано розрахункову схему для аналізу стійкості. Врахування роз'ємних з'єднань проводилося наступним чином:

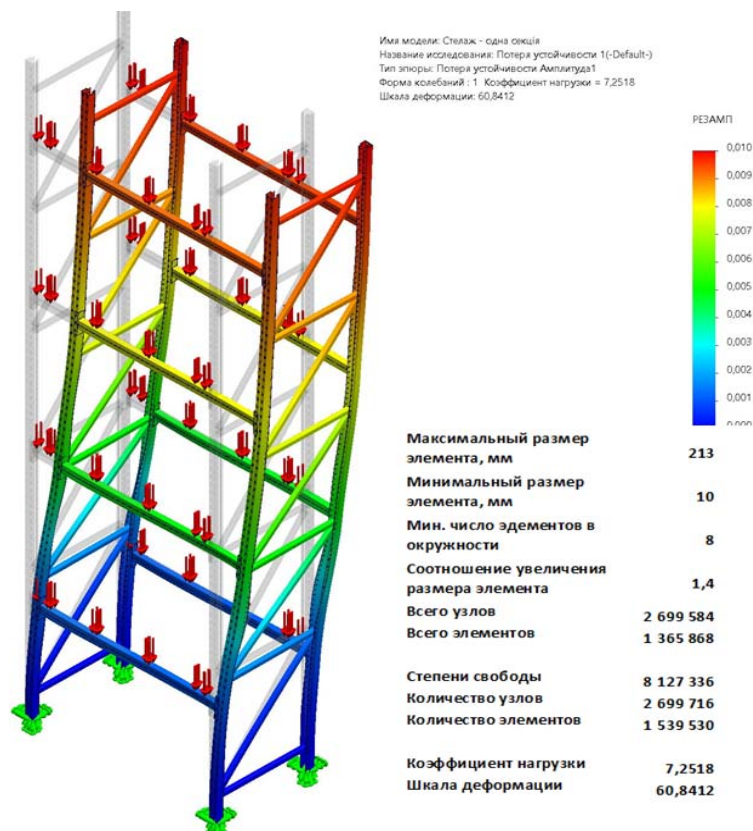
- болтові з'єднання розкосів зі стійками моделювалися з'єднаннями типу «штифт», що моделює вільний поворот кінця розкоса щодо болта, який з'єднує розкіс зі стійкою.
- взаємодія зачепів кронштейна зі стійкою моделювалася шляхом завдання жорстких зв'язків граней зачепів з гранями стійки, що контактують.

Грані балки зв'язувалися жорсткими зв'язками із відповідними гранями кронштейнів. Вид спирання стійок задавалася «зафіксована геометрія», що забезпечує жорсткий зв'язок нижнього перерізу кожної стійки з основою. Навантаження, що діють на стелаж, задавалися з умови розташування в кожному осередку двох палет по 500 кг.

Для проведення розрахунку було сформовано скінчено-елементну сітку з такими характеристиками: розміри елемента: min 10 мм; max 213 мм; загальна кількість ступенів свободи становила 8 127 336.

При розрахунку визначалися коефіцієнт запасу стійкості (коефіцієнт навантаження у термінах SOLIDWORKS) секції стелажу та перша форма втрати стійкості. Результати аналізу стійкості та характеристики сітки представлені на рис. 6. Як видно з наведеного малюнка, першою формою втрати стійкості є згинальна форма загальної втрати стійкості. Коефіцієнт запасу стійкості дорівнює 7,25.

Цей результат отримано при максимальному наближенні розрахункової схеми до реальної конструкції - всі елементи моделювалися пружними оболонками, кріпильні деталі - пружними 3-мірними тілами. Враховувалися також болтові з'єднання розкосів та з'єднання кронштейнів вантажних балок із стійками.



**Рис. 6** – Результати розрахунку стійкості вихідної оболонкової моделі секції стелажу



Така точна розрахункова схема, з іншого боку, під час вирішення вимагала серйозних ресурсів комп'ютера. Розмірність завдання становила понад 8 млн. рівнянь – за ступенем свободи. Якщо таку розрахункову схему використовуватиме при побудові моделі багатосекційного стелажа, це призведе до завдань дуже великої розмірності що в свою чергу призведе до серйозних обчислювальних труднощів. Тому актуальним стає спрощення розрахункової схеми з метою зниження розмірності завдання. Причому спрощення має бути виконане таким чином, щоб воно не суттєво позначилося на точності результатів розрахунку. Таким чином, необхідно перейти до побудови спрощеної розрахункової схеми секції стелажу.

Напрямом спрощення побудованої розрахункової схеми пропонується заміна деталей кріплення абсолютно жорсткими тілами. Дійсно, пружні властивості болтів і гайок навряд чи істотно впливають на пружні властивості всієї системи.

Наступне припущення полягає у поданні розкосів та балок спрощеними балочними елементами. Таку заміну можна зробити оскільки ці елементи повністю відповідають критеріям балкового елемента: постійне по довжині поперечний переріз, довжина елемента більш ніж у 10 разів перевищує найбільший розмір поперечного перерізу.

Для моделювання балкових елементів у SOLIDWORKS SYMULATION всім розкосам та балкам було присвоєно властивість «Розглядати як балку». При заміні розкосів балочними елементами у вузлах на кінцях були задані шарнірні з'єднання що моделюють болтові з'єднання в реальному стелажі. Вузли на кінцях балок жорстко пов'язані з відповідними гранями кронштейнів. Зв'язки 3-D моделей кронштейнів із гранями оболонки стійки не змінювалися. Перед розрахунком була сформована скінчено-елементна сітка з тими самими параметрами, що у перших двох випадках. Результати розрахунку такого варіанта спрощення представлені на рис. 7. Результати розрахунків зведемо в таблицю 1.

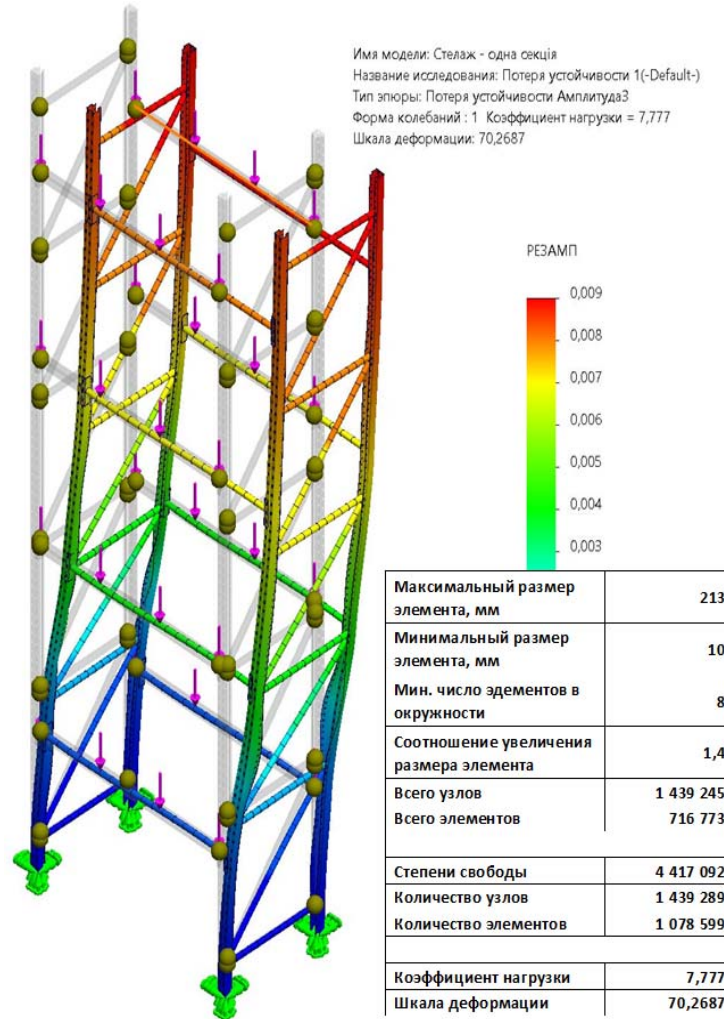
Таблиця 1 - Результати розрахунків для перших двох схем спрощення

Оцінюваний параметр	Первинна модель	Спрощена розрахункова схема
1-ша форма втрати стійкості	згинальна	згинальна
Коефіцієнт запасу зі стійкості	<b>7,25</b>	<b>7,77</b>
Число ступенів свободи	<b>8 127 336</b>	<b>4 417 092</b>

Якщо порівнювати початковий варіант та останній результат розрахунків отримуємо, що введена система спрощень призвела до незначного збільшення коефіцієнта стійкості з 7,25 до 7,77. (Збільшення на 7%) але з іншого боку такі спрощення призвели до зменшення розмірності завдання майже вдвічі. Проте розмірність завдання залишається поки що досить високою. Наприклад, якщо цю розрахункову схему використовувати як базову для побудови схеми 5-ти секційного стелажу, то в ньому братиме участь 3 таких секції, а отже, розмірність завдання складе понад 13 млн. ступенів свободи. Чисельний розрахунок завдання такої розмірності може спричинити серйозні труднощі.

Тому наступним напрямом у побудові ефективної розрахункової схеми є вибір параметрів скінчено-елементної сітки, яка забезпечить прийнятну розмірність задачі та точність результатів.

Відомо, що під час проведення розрахунків з використанням скінчено-елементних схем результат розрахунку багато в чому визначається якістю сітки. Чим дрібніша сітка, тим точніше модель апроксимує реальну конструкцію, а отже, і точніше результат. Але з іншого



**Рис. 7** – Результати розрахунків при поданні розкосів та вантажних балок спрощеними балочними елементами

боку зменшення величини кінцевих елементів призводить до збільшення ступенів свободи розрахункової скінчено-елементної схеми а, отже, і збільшення розмірності завдання що у свою чергу може призвести до серйозних обчислювальних труднощів. Тому при виборі розмірів сітки необхідно шукати розумний компроміс між точністю моделювання реальної системи та точністю отримуваних результатів.

При аналізі стійкості секції стелажу та реалізації спрощення розмір сітки залишався незмінним. Це дозволило провести коректне порівняння одержуваних результатів. Тепер для зниження розмірності завдання проведемо такі дослідження. Для останньої отриманої розрахункової схеми, в якій розкоси та балки представлені спрощеними балочними елементами, а кріпильні деталі – абсолютно жорсткими тілами, проведемо розрахунки за різних розмірів скінчено-елементної сітки.

З цією метою при формуванні сітки змінювався показник щільності сітки. У результаті були побудовані дві спрощені схеми з різними сітками:

1. спрощена схема №1 з розмірами скінченого елемента (min|max, мм) 18/90, які забезпечили 2 060 868 ступенів свободи

2. спрощена схема №2 з розмірами скінченого елемента (min|max, мм) 21/106 з 1 820 598 ступенями свободи

Результати розрахунків стійкості секції стелажу для різних параметрів сітки для спрощеної моделі наведені в таблиці 2. В останньому стовпці цієї таблиці наведені отримані раніше розрахункові дані первинної неспрощеної моделі.

Таблиця 2 - Результати розрахунків за різної щільності сітки

Оцінюваний параметр	Спрощена розрахункова схема			Первинна (неспрощена) розрахункова схема
	Початкова щільність сітки	Розрахункова схема №1	Розрахункова схема №2	
Розмір кінцевого елемента min/max, мм	<b>10/213</b>	<b>18/90</b>	<b>21/106</b>	<b>10/213</b>
Число ступенів свободи	<b>4 417 092</b>	<b>2 060 868</b>	<b>1 820 598</b>	<b>8 127 336</b>
1-ша форма втрати стійкості	<b>згинальна</b>	<b>згинальна</b>	<b>згинальна</b>	<b>згинальна</b>
Коефіцієнт запасу зі стійкості	<b>7,77</b>	<b>8,11</b>	<b>8,31</b>	<b>7,25</b>

### Висновки

У цій роботі побудовано уточнену 3-D модель металоконструкції секції збірно-розбірної палетного стелажу що максимально наближена до реальної конструкції. Всі елементи металоконструкції представлені оболонковими тонкостінними моделями, кріпильні деталі, що беруть участь у болтових з'єднаннях, моделюються пружними 3-х мірними тілами. Проведений розрахунок стійкості дозволив визначити коефіцієнт запасу стійкості, який при заданій схемі навантаження склав 7,25. Однак такий розрахунок зажадав значних ресурсів обчислювальної системи. Достатньо відзначити, що розмірність скінчено-елементної сітки склала 8 127 336 ступенів свободи. Така розмірність неприйнятна у разі використання такої розрахункової схеми як базової для побудови розрахункової схеми багатосекційного стелажу.

В результаті проведених досліджень запропоновано спрощену розрахункову схему секції збірно-розбірної палетного стелажу. Ця схема враховує всі конструктивні особливості складових елементів металоконструкції стелажу та характер збірно-розбірних з'єднань, за допомогою яких ці елементи пов'язані один з одним. У ній реалізована система спрощень, яка полягає в тому, що деталі кріплення представлені абсолютно жорсткими тілами, а розкоси і вантажні балки представлені спрощеними балочними елементами. Опорні стійки та кронштейни моделюються просторовими тонкостінними оболонками.

Для зменшення розмірності скінчено-елементної схеми було вивчено вплив щільності сітки на розрахунки стійкості секції стелажу. В результаті на основі спрощеної розрахункової схеми були побудовані дві схеми з різною щільністю сітки. Розрахункова схема №1 з розмірністю 2 060 868 ступенів свободи і розрахункова схема №2 з більш грубою сіткою дає 1 820 598 ступенів свободи.

Порівняння спрощеної розрахункової схеми з різними скінчено-елементними сітками з первинною (неспрощеною моделлю) призводить до таких висновків.

Спрощена розрахункова схема №1 призводить до зміни визначення коефіцієнта стійкості з 7,25 у вихідній неспрощеній моделі до 8,11 у спрощеній. Таким чином, розрахункова схема з такими параметрами сітки призводить до помилки у визначенні коефіцієнта стійкості в 11%.

Спрощена розрахункова схема №2 з сіткою з 1 820 598 ступенів свободи призводить до зміни у визначенні коефіцієнта стійкості з 7,25 у вихідної не спрощеної моделі до 8,31 у спрощеної. Помилка у визначенні коефіцієнта стійкості у цьому разі становить 15%.

Спільним для обох цих спрощених схем є те, що розмірність завдання визначення стійкості обох схем майже 4 рази менше розмірності первинної задачі. Помилка визначення коефіцієнта стійкості становить від 11% до 15%. Цих даних достатньо для прийняття рішення про вибір найбільш ефективної розрахункової схеми, яку можна використовувати для побудови схеми багатосекційного стелажу.

Залежно від постановки завдання можна вибирати ту чи іншу розрахункову схему. Якщо ставиться завдання визначення стійкості багатосекційного стелажу, найкраще за основу прийняти розрахункову схему №1. Її використання призведе не тільки до побудови підсумкової розрахункової схеми з прийнятною розмірністю, але й результат, який буде отримано, буде з достатньою для практичної мети точністю.

Якщо ставиться завдання якісної оцінки впливу тих чи інших параметрів на стійкість багатосекційного стелажу, краще розрахункова схема №2 з грубішою сіткою. Розрахункова схема багатосекційного стелажу у разі буде побудована з меншим числом ступенів свободи, а точність у визначенні параметрів щодо якісних досліджень не є такою критичною.

#### **Список використаних джерел:**

1. ДСТУ EN 15620:2015. Системи складські стаціонарні сталеві. Збірно-розбірні палетні стелажні системи. Допуски, деформації та зазори. – [Чинний від 2015–11–01]. – Київ : УкрНДНЦ, 2015. – 77 с.
2. ДСТУ EN 15512:2015. Системи складські стаціонарні сталеві. Збірно-розбірні палетні стелажні системи. Принципи проектування конструкцій. – [Чинний від 2015–11–01]. – Київ : УкрНДНЦ, 2015. – 140 с.
3. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-3:2012. Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-3. Загальні положення. Додаткові правила для холоднодеформованих елементів та пластин. – [Чинний від 2013–07–01]. – Київ : УкрНДПроектстальконструкція, 2012. – 22 с.
4. Юрченко В. В. Несуча здатність стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів / В. В. Юрченко, А. В. Перельмутер. – Київ : Каравела, 2020. – 310 с.
5. Бритвин Е. И. К расчету рамных конструкций, составленных из тонкостенных стержневых элементов / Е. И. Бритвин // Строительная механика и расчет сооружений. – 2016. – № 4. – С. 43–54.
6. Okhten I. O. Analysis of the loss of stability of open profile thin-walled rods, into account the imperfections of the form / I. O. Okhten, O. O. Lukianchenko // *Strength of Materials and Theory of Structures*. – 2022. – Iss. 108. – P. 360–368.
7. Okhten I. O. Some aspects of consideration of initial imperfections in the calculations of stability of thin-walled elements of open profile / I. O. Okhten, O. O. Lukianchenko // *Strength of Materials and Theory of Structures*. – 2021. – Iss. 106. – P. 122–128.
8. Perelmuter A. V. To the calculation of steel structures from thin-walled rods / A. V. Perelmuter // *Strength of Materials and Theory of Structures*. – 2021. – Iss. 108. – P. 119–130.
9. Дзюба А. П. Экспериментальное исследование устойчивости цилиндрических оболочек, ослабленных круговыми отверстиями при кручении / А. П. Дзюба, Е. Ф. Прокопало, П. А. Дзюба // *Проблемы прочности*. – 2017. – № 6. – С. 111–121.
10. Дзюба А. П. Экспериментальные исследования устойчивости ослабленных круговыми отверстиями цилиндрических оболочек при осевом сжатии / А. П. Дзюба // *Проблемы вычислительной механики и прочности конструкций : сб. науч. трудов*. – 2020. – Вып. 32. – С. 23–49.
11. Дзюба А. П. Несуча здатність циліндричних оболонок з отворами / А. П. Дзюба, Е. Ф. Прокопало, П. А. Дзюба. – Дніпропетровськ : Ліра, 2014. – 224 с.
12. Numerical modelling of perforated shells stability / A. A. Antipov [et al.] // *PNRPU Mechanics Bulletin*. – 2015. – № 1. – P. 21–30.
13. Convergence of the finite element method and the semi-analytical finite element method for prismatic bodies with variable physical and geometric parameters / V. A. Bazhenov [et al.] // *Strength of Materials and Theory of Structures*. – 2021. – Iss. 106. – P. 92–104.
14. Лук'янченко О. О Комп'ютерне моделювання в задачах стійкості тонкостінних стержнів відкритого профілю з недосконаlostями форми / О. О. Лук'янченко, І. О. Охтен // *Управління розвитком складних систем*. – 2021. – № 47. – С. 95–101.
15. Bilyk S. I. Determination of changes in thermal stress state of steel beams in LIRA-SAPR software / S. I. Bilyk, O. Y. Bashynska, O. V. Bashynskiy // *Strength of Materials and Theory of Structures*. – 2022. – Iss. 108. – P. 189–202.

**References**

1. Ukrainskyi naukovo-doslidnyi i navchalnyi tsentr problem standartyzatsii, sertyfikatsii ta yakosti 2015, *DSTU EN 15620:2015 Systemy skladski statsionarni stalevi. Zbirno-rozbirni paletni stelazhni systemy. Dopusky, deformatsii ta zazory*, Ukrainskyi naukovo-doslidnyi i navchalnyi tsentr problem standartyzatsii, sertyfikatsii ta yakosti, Kyiv.
2. Ukrainskyi naukovo-doslidnyi i navchalnyi tsentr problem standartyzatsii, sertyfikatsii ta yakosti 2015, *DSTU EN 15512:2015 Systemy skladski statsionarni stalevi. Zbirno-rozbirni paletni stelazhni systemy. Pryntsyp uproektuvannia konstruktsii*, Ukrainskyi naukovo-doslidnyi i navchalnyi tsentr problem standartyzatsii, sertyfikatsii ta yakosti, Kyiv.
3. Ukrainskyi naukovo-doslidnyi ta proektnyi instytut stalevykh konstruktsii 2006, *DSTU EN -NB EN 1993-1-3:2012 Yevrokod 3. Proektuvannia stalevykh konstruktsii. Chastyna 1-3. Zahalni polozhennia. Dodatkovy pravyla dlia kholodnodeformovanykh elementiv ta plastyn* [EN 1993-1-3:2006 Eurocode 3: Design steel structures – Part 1-3: General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting], Ukrainskyi naukovo-doslidnyi ta proektnyi instytut stalevykh konstruktsii, Kyiv.
4. Yurchenko, VV & Perelmuter, AV 2020, *Nesucha zdatnist sterzhnevyykh elementiv konstruktsii iz kholodnohnutykh profiliv*, Karavela, Kyiv.
5. Brytvyn, EY 2016, 'K raschetu ramnykh konstruktsiy, sostavlennykh iz tonkostennykh sterzhnevyykh elementov', *Stroytelnaia mekhanika i raschet sooruzheniy*, no. 4, pp. 43-54.
6. Okhten, IO & Lukianchenko, OO 2022, 'Analysis of the loss of stability of open profile thin-walled rods, into account the imperfections of the form', *Strength of Materials and Theory of Structures*, iss. 108, pp. 360-368.
7. Okhten, IO & Lukianchenko, OO 2021, 'Some aspects of consideration of initial imperfections in the calculations of stability of thin-walled elements of open profile', *Strength of Materials and Theory of Structures*, iss. 106, pp. 122-128.
8. Perelmuter, AV 2021, 'To the calculation of steel structures from thin-walled rods', *Strength of Materials and Theory of Structures*, iss. 108, pp. 119-130.
9. Dziuba, AP, Prokopalo, EF & Dziuba, PA 2017, 'Eksperimentalnoye issledovaniye ustoychivosti tsilindricheskikh obolochek, oslablennykh krugovymi otverstiyami pri kruchenii', *Problemy prochnosti*, no. 6, pp. 111-121.
10. Dziuba, AP 2020, 'Eksperimentalnyye issledovaniya ustoychivosti oslablennykh krugovymi otverstiyami tsilindricheskikh obolochek pri osevom szhatii', *Problemy vychislitelnoy mekhaniki i prochnosti konstruktsiy*, iss. 32, pp. 23-49.
11. Dziuba, AP, Prokopalo, YeF & Dziuba, PA 2014, *Nesucha zdatnist tsylindrychnykh obolonok z otvoramy*, Lira, Dnipropetrovsk.
12. Antipov, AA, Artemyeva, AA, Bazhenov, VG, Zhestkov, MN & Kibec, AI 2015, 'Numerical modelling of perforated shells stability', *PNRPU Mechanics Bulletin*, no. 1, pp. 21-30.
13. Bazhenov, VA, Horbach, MV, Martyniuk, IYu & Maksimyuk, OV 2021, 'Convergence of the finite element method and the semi-analytical finite element method for prismatic bodies with variable physical and geometric parameters', *Strength of Materials and Theory of Structures*, iss. 106, pp. 92-104.
14. Lukianchenko, OO & Okhten, IO 2021, 'Kompiuterne modeliuvannia v zadachakh stiikosti tonkostinnykh sterzhniv vid krytoho profilu z nedoskonalostiamy formy', *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system*, no. 47, pp. 95-101.
15. Bilyk, SI, Bashynska, OY & Bashynskiy, OV 2022, 'Determination of changes in thermal stress state of steel beams in LIRA-SAPR software', *Strength of Materials and Theory of Structures*, iss. 108, pp. 189-202.

Стаття надійшла до редакції 24 січня 2023 року