

УДК 624.072.32

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОСТОРОВОЇ СТІЙКОСТІ АРКОВИХ
МЕТАЛЕВИХ КАРКАСІВ БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД, ЗІ ЗВАРНИХ
ДВОТАВРІВ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ
АРОЧНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КАРКАСОВ ЗДАНИЙ И
СООРУЖЕНИЙ, ИЗ СВАРНЫХ ДВУТАВРОВ**

**RESEARCH OF SPATIAL BUCKLING OF STEEL FRAMES OF
BUILDINGS AND STRUCTURES WITH WELDED I-BEAM CROSS-
SECTION ARCHES**

Білик С.І., д.т.н., проф., Шпында В.З., аспірант (Київський Національний університет будівництва і архітектури, м. Київ).

Билык С.И., д.т.н., проф., Шпында В.З., аспирант (Киевский Национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев).

Bilyk S.I., doctor of technical sciences, professo, Shpynda V.Z. postgraduate student, (Kyiv National university of construction and architecture, Kyiv).

Представлені результати числових та аналітичних досліджень просторової стійкості каркасів з арок та впливу загальної жорсткості каркасу на стійкість окремої арки.

Представлены результаты численных и аналитических исследований пространственной устойчивости каркасов из арок и влияния общей жесткости каркаса на устойчивость отдельной арки.

The results of numerical and analytical research of the spatial buckling of frames of the arches and the impact of the overall frame stiffness on the buckling of the single arch.

Ключові слова:

Арки, металеві каркаси, стійкість, загальна жорсткість, піддатливість.

Арки, металлические каркасы, устойчивость, общая жесткость, податливость.

Arch, steel frames, buckling, total stiffness, ductility.

Вступ. Найбільш важливим критерієм при проектуванні каркасів прольотних будівель є забезпечення стійкості основних несучих елементів як у своїй площині, так і при крутильно-згинальній формі втрати стійкості

(стійкість плоскої форми згину). Головною особливістю пролітних конструкцій із двотаврів є невелика крутильна, а також згинальна жорсткість із площини стінки. Існує два варіанти забезпечення стійкості плоскої форми згину:

- Підвищення стійкості за рахунок збільшення перерізу з площини дії моменту, що є не раціональним, оскільки приводить до надмірних перевитрат сталі.
- Встановлення системи горизонтальних в'язей та розпірок, що забезпечує належне розкріплення головних несучих елементів каркасу, чим зменшує їхню розрахункову довжину.

В основі існуючих теорій розрахунку пролітних конструкцій на стійкість, в тому числі і з арок, лежить відокремлення головного несучого елемента із структури каркасу та проведення розрахунків на втрату стійкості в площині, а також на втрату стійкості плоскої форми згину. При цьому арка розглядається як окремий елемент, що має дві точки опирання в своїй площині та певну кількість розкріплень з площини, що залежить від особливостей загальної конструктивної схеми каркасу будівлі (крок прогонів, розпірок, місця розміщення в'язевих блоків). В даному випадку якщо при розрахунку на стійкість арки у своїй площині крок розкріплення не відіграє ніякого значення, то при перевірці стійкості плоскої форми згину даний фактор відіграє вирішальну роль.

В нормативних документах [1] та [2] при розрахунку на крутильно-згинальну форму втрати стійкості, прийняті граничні умови при яких точки розкріплення головних несучих елементів каркасу з площини (розпірками, в'язями чи прогонами покриття) мають абсолютну жорсткість, тобто не допускають можливих переміщень при випинанні з площини, чи крутінні перерізу що розкріплюється. На практиці ж проявляється інший ефект: жорсткість опор що розкріплюють елемент з площини залежить від ряду факторів:

- жорсткості елементів розкріплення;
- конструктивних особливостей вузлів з'єднання з елементами розкріплення;
- кількості головних несучих елементів каркасу в поздовжньому напрямку.
- кроку встановлення в'язевих блоків що сприймають горизонтальні зусилля.

Дані фактори мають безпосередній вплив на стійкість не тільки одиничних елементів, але й всього каркасу в цілому. Дослідження явища піддатливості конструкції каркасу має велике практичне значення, адже врахування даного ефекту дозволяє раціонально проектувати каркаси пролітних будівель, як з точки зору витрат сталі так і надійності.

Аналіз останніх досліджень. Дослідження просторової стійкості рамних елементів змінного перерізу наведені у роботі [3, с.225]. В даній роботі детально розглянута втрата стійкості плоскої форми згину двотаврових рам, наведені коефіцієнти розрахункової довжини для рам змінного перерізу різноманітних конфігурацій, але не розглянуте питання просторової стійкості усього каркасу та впливу елементів розкріплення на стійкість одиничних рам.

Задача з врахуванням піддатливості точок розкріплення арки при розрахунку стійкості з площини розглянута в роботі [4, с. 19-62] на прикладі поясів решітчастих арок покриття. Але в даній роботі не була врахована загальна жорсткість каркасу будівлі, розглядалися різні варіанти граничних умов обпирання та з'єднання (шарнірне чи жорстке) елементів розкріплення з поясами решітчастих арок.

Визначення впливу в'язевих систем на загальну крутильно-згинальну стійкість рам і елементів каркасу, досить детально описано в роботі [5, с.548-582]. В даній роботі наведена методика визначення поздовжнього зусилля в елементах розкріплення при втраті стійкості рами, викладені основні вимоги щодо граничної піддатливості окремих поперечних в'язей та їхньої системи в цілому. Розглянутий принцип щодо визначення загального значення поперечної сили при втраті стійкості рам каркасу.

Питання жорсткості горизонтальних в'язей та розпірок що розкріплюють стиснуті елементи каркасу також розглядалось в роботі [6, с. 78-80].

Дослідження питань загальної стійкості позацентрово-стиснутих елементів розглядалось в роботах [7 – 12].

В роботі [13] розглянуто просторову стійкість тонкостінних профілів розкріплених профільованим настилом. Запропонована для таких конструкцій розрахункова модель пружного елемента на пружних в'язях зсуву, які рівномірно розподілені по довжині приєднання профільованого настилу до полиць. Така модель передбачає врахування піддатливості пружних опор в залежності від перемішень і деформацій в самій точці розташування пружної в'язі зсуву.

Постановка мети і задач досліджень. Метою дослідження є визначення впливу жорсткості каркасу будівлі та піддатливості елементів розкріплення на втрату стійкості окремої арки та каркасу будівлі в цілому.

Аналіз виконаних досліджень показує, що критичне навантаження на головні несучі елементи каркасу залежить від кількості поперечників у поздовжньому напрямку будівлі, а також від кількості та місць встановлення горизонтальних та вертикальних в'язевих блоків. Тому виникає необхідність вирішення наступних задач:

1. Встановленню додаткових навантажень на горизонтальні в'язеві блоки покриття від деформацій арок при втраті стійкості плоскої форми згину.
2. Розрахунку піддатливості опор (місць розкріплення арок з площини другорядними елементами каркасу).

3. Розрахунку коефіцієнтів впливу на стійкість окремих поперечників, що залежать від кількості головних несучих елементів каркасу в поздовжньому напрямку та кількості і виду в'язевих блоків.

Методика досліджень. Пропонується розглянути роботу конструкцій каркасу з круглих арок двотаврового перерізу, із точки зору просторової втрати стійкості у складі каркасів будівель та споруд. Для визначення впливу на загальну стійкість каркасу жорсткості елементів розкріплення, конструктивних особливостей вузлів, кількості поперечників у поздовжньому напрямку, а також систем в'язевих блоків пропонується провести загальний просторовий розрахунок каркасу будівлі з круглих арок двотаврового перерізу. Для визначення закономірностей впливу наведених вище факторів, на загальну стійкість каркасу, розглянуті різні варіанти компонування моделі (з різною кількістю арок в поздовжньому напрямку, а також з та без врахування систем горизонтальних в'язей). Розрахунки проведені у програмному комплексі Ansys Student Release 15.0 за допомогою розрахункових модулів «Static Structural» та «Linear Buckling». Модель являє собою каркас з круглих арок складеного двотаврового перерізу з шарнірним закріпленням опор. Побудова розрахункової моделі виконана з врахуванням всіх конструктивних особливостей вузлів щоб привести модель якомога ближче до реальних умов роботи конструкції. Загальний вигляд та моделі наведений на рисунку 1.

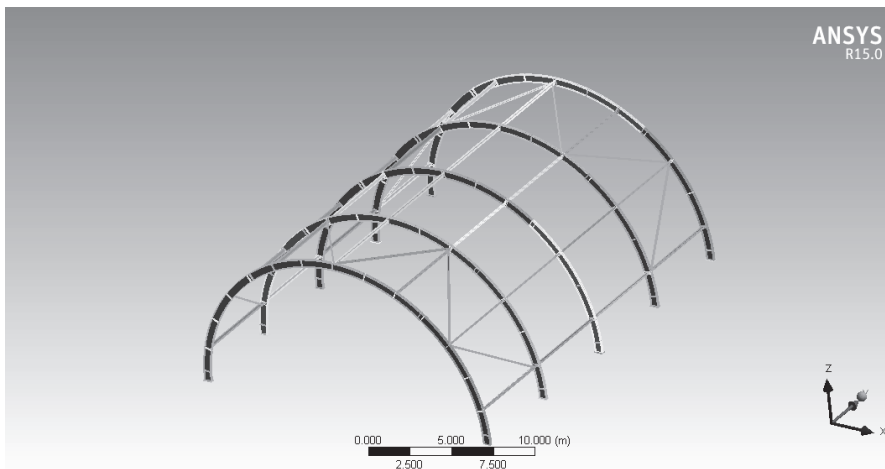


Рис.1. Загальний вигляд моделі аркового каркасу.

Результати досліджень. Згідно роботи [5, ст. 548] елементи горизонтальної в'язевої системи повинні сприймати не тільки зовнішні поперечні навантаження, але й додаткові зусилля які виникають у стиснуто-зігнутих поперечниках каркасу:

$$S_{\Sigma} = S_0 + S_{\text{фіс}}, \quad (1)$$

де S_0 – зусилля від зовнішніх навантажень;

$S_{\text{фіс}}$ – додаткові зусилля при втраті стійкості поперечників каркасу.

Для знаходження сумарного значення навантаження на в'язеві блоки необхідно обчислити значення поздовжнього зусилля в точках розкріплення арок [7,].

Визначення значення поздовжнього зусилля $S_{\text{фіс}}$ в елементах розкріплення при втраті стійкості конструкції арки можна провести наступним шляхом. Використаємо рівняння рівноваги круглої арки у випадку просторової деформації (втрати стійкості), які наведені у роботі [7, с. 23]:

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{d\theta} + R^2 \times p_x \times \omega_x + R \times p_y &= 0; \\ \frac{dM_x}{d\theta} + M_z - R \times N_1 &= 0; \\ \frac{dM_z}{d\theta} &= M_x; \\ E \times I_x \times \omega_x &= M_x; \\ C \times \tau &= M_z; \\ \omega_x &= \frac{1}{R} \times \left(\frac{d\alpha}{d\theta} + \gamma \right); \\ \omega_z &= \frac{1}{R} \times \left(\frac{d\gamma}{d\theta} - \alpha \right); \\ -\alpha &= \frac{1}{R} \times \frac{dv}{d\theta}; \end{aligned} \quad (2)$$

Невідомим що необхідно знайти є поперечна реакція N_1 в точці розкріплення арки з площини. Опускаючи математичні викладки, з диференціальних рівнянь (2) отримуємо:

$$N_1 = -R^2 \times p_x \times \frac{M_x}{E \times I_x} \times \theta - R \times p_y \times \theta; \quad (3)$$

$$N_1 = \frac{M_x + M_z \times \theta}{R \times \theta}, \quad (4)$$

M_x, M_z – значення згинальних моментів навколо осей X та Z.

p_x, p_y – навантаження на арку у площинах X та Y відповідно.

R – радіус арки.

θ – кут між точками розкріплення арки (з площини).

E, I_x – модуль пружності та момент інерції відповідно.

Виходячи з вищенаведених рівнянь, знаючи критичні значення моменту та навантаження на конструкцію арки при втраті стійкості можна знайти значення поздовжнього зусилля в елементі розкріплення.

Аналогічним способом, використовуючи рівняння рівноваги Кірхгофа для тонкого криволінійного стержня при просторовій деформації [7,с.19], можна отримати значення поздовжнього зусилля в одиничних елементах розкріплення арок будь якої форми кривої.

Вирішення даної задачі дозволяє визначити додаткове навантаження на елементи розкріплення при втраті стійкості поперечників каркасу.

Наступною задачею є розрахунок піддатливості точок розкріплення арки з площини. Згідно [1] та [2] розрахунок арки на втрату стійкості плоскої форми згину проводиться за умови, що значення розрахункової довжини елемента визначається з добутку фактичної довжини елемента між точками його розкріплення на відповідне значення коефіцієнта розрахункової довжини. Отже для розкріплення основних несучих елементів з площини згину необхідно забезпечити абсолютну жорсткість опор в точках примикання розпірок та в'язей. В даному випадку конструкцію арки можна представити у вигляді багатопролітного нерозрізного стержня, який втрачає стійкість по одній півхвилі синусоїди між точками розкріплення (опор). При недостатніх значеннях жорсткості проміжних опор, втрата стійкості арки буде відбуватись по одній півхвилі між точками розкріплення, які будуть мати достатню жорсткість. Це приводить до збільшення розрахункової довжини елемента та зменшення значення критичного навантаження на поперечники каркасу.

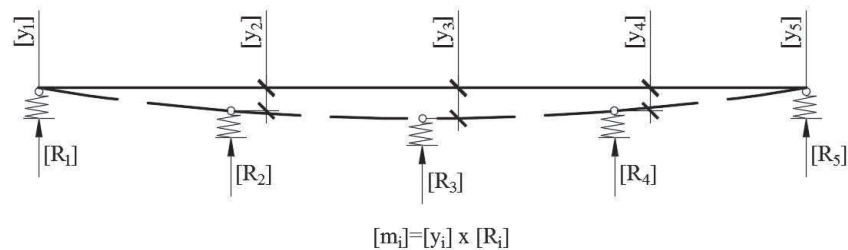


Рис.2. Загальний вигляд моделі аркового каркасу

В даному випадку значення жорсткості опори можна знайти за формулою наведеною у роботі [8,с. 50]:

$$y = \frac{m}{R}, \quad (5)$$

y – значення переміщення (прогину) опори.
 R – опорна реакція, яку сприймає опора.

Для вирішення задачі про забезпечення жорсткості опор при яких вони не зазнають перемішень, можна скористатись методикою розробленою

Бубновим І.Г. [8,с.56] для стержня що опирається на ряд опор однакової жорсткості, які знаходяться одна від одної на рівній відстані. Значення необхідної жорсткості опори [m] при якій точка обпирання не зазнає переміщень, можна знайти за формулою:

$$m = \frac{\beta \times l}{(n+1) \times P_{кр}} \quad (6)$$

n+1 – число прольотів стержня;
 β – коефіцієнт піддатливості.
 l – відстань між точками опор.

Перейдемо до вирішення третьої задачі. Оскільки матеріалів, а також методик для визначення коефіцієнтів впливу структури всього каркасу на стійкість окремих поперечників немає, були проведені числові дослідження у програмному комплексі Ansys Student Release 15.0 за допомогою розрахункових модулів «Static Structural» та «Linear Buckling». Модуль «Linear Buckling» дозволяє знайти значення критичного навантаження на конструкцію, а також отримати графічну схему деформацій при різних формах втрати стійкості.

Для отримання даних щодо значень критичного навантаження [$P_{buckling}$] було побудовано та розраховано 12 моделей каркасів з різною кількістю поперечників та в'язевих блоків.

Перейдемо до результатів розрахунку. Проаналізуємо наведену на рисунках 3 та 4 деформовану схему втрати стійкості каркасу будівлі.

Помітно, що у каркасі без в'язей, втрата стійкості арки до якої було прикладено навантаження приводить до деформацій інших елементів каркасу, а саме:

- деформацій елементів розкріплення;
- випинанню з площини всіх наступних головних несучих елементів каркасу;

В каркасі з встановленими в'язевими блоками на торцях, форма втрати стійкості окремої арки відрізняється: арка втрачає стійкість по одній півхвилі синусоїди між точками розкріплення її з площини. При цьому значення критичного навантаження на систему збільшується на 25%, в порівнянні із аналогічною схемою без в'язей. Наведені результати наглядно показують необхідність розрахунку горизонтальних в'язевих блоків не тільки на дію зовнішніх навантажень, але й сприйняття додаткових поперечних зусиль [$S_{пе}$] для забезпечення необхідної жорсткості та загальної стійкості всього каркасу.

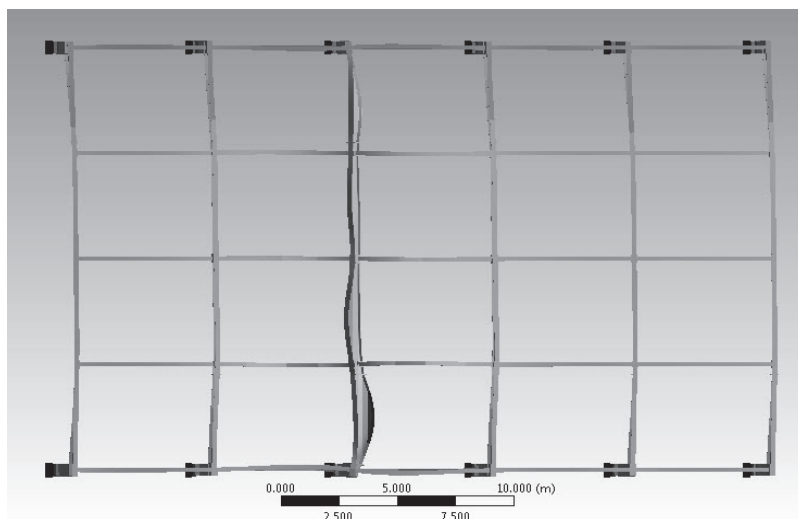


Рис.3. Деформована схема безв'язевого каркасу після втрати стійкості одного з поперечників

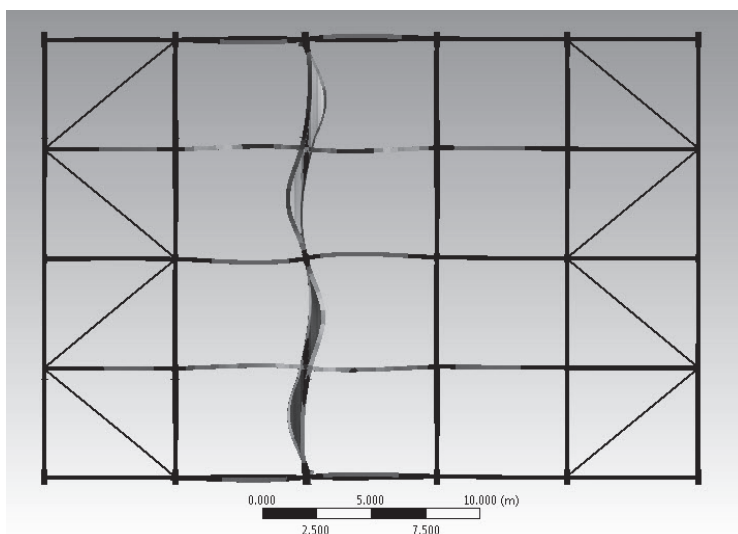


Рис.4. Деформована схема каркасу із в'язевими блоками після втрати стійкості одного з поперечників

Для зручності проведення ітерацій в програмному комплексі значення критичного навантаження обчислюється за формулою:

$$[P_{buckling}] = [P_{actual}] \times [\lambda] \quad (7)$$

P_{buckling} – критичне навантаження;
 P_{actual} – існуюче навантаження;
 λ – коефіцієнт навантаження.

Порівняння значень коефіцієнта критичного навантаження $[\lambda]$ для каркасів з різними схемами компонування, наведено у вигляді гістограм, зображених на рисунках 5 та 6.

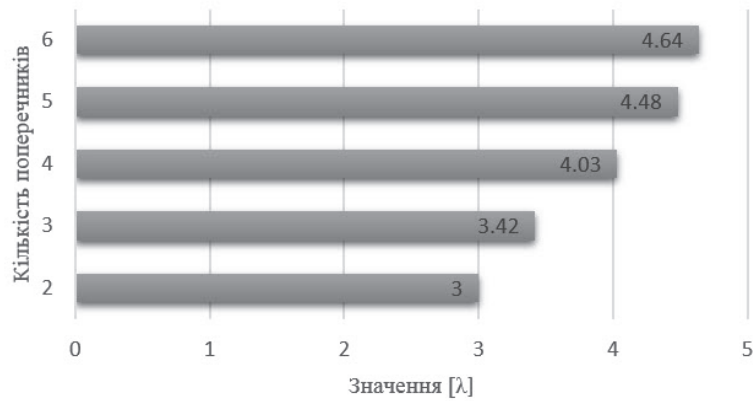


Рис.5. Гістограма залежності P_{buckling} від $[\lambda]$ для каркасів без в'язевих блоків

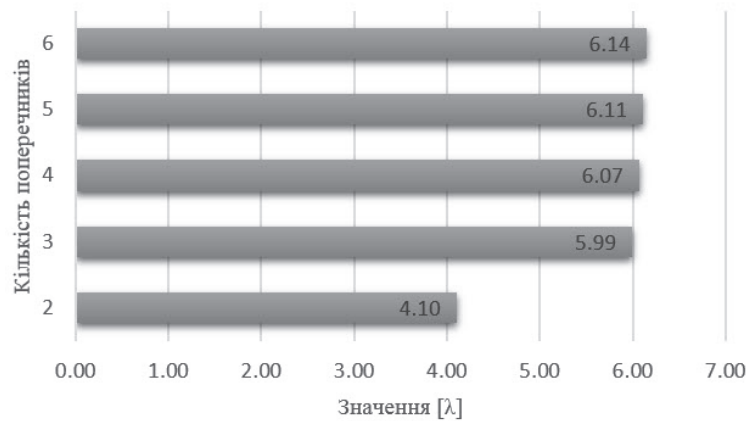


Рис.6. Гістограма залежності P_{buckling} від $[\lambda]$ для каркасів з в'язевими блоками на торцях

Виходячи з даних наведених в гістограмах, бачимо істотний вплив як кількості поперечників у складі каркасу так і встановлення в'язевих блоків на стійкість окремої арки. Особливо, ефект жорсткості каркасу має вплив на системи з невеликою кількістю поперечників, що має велике практичне

значення для мостових конструкцій з арок, де зазвичай дві, об'єднані в'язями, поздовжні арки є головною несучою конструкцією.

На рисунку 7 наведений графік залежності $[\lambda]$ від кількості поперечників для каркасів без в'язей, із в'язевими блоками на торцях будівлі та окремої арки.

Графік 7 чітко демонструє явище впливу просторової піддатливості каркасу на значення критичного навантаження для окремої арки. При цьому різниця між значеннями критичної сили для різних варіантів компоновки становить від 14 % (для каркасів із 6-ма поперечниками) до 64% (для каркасів із двома поперечниками).

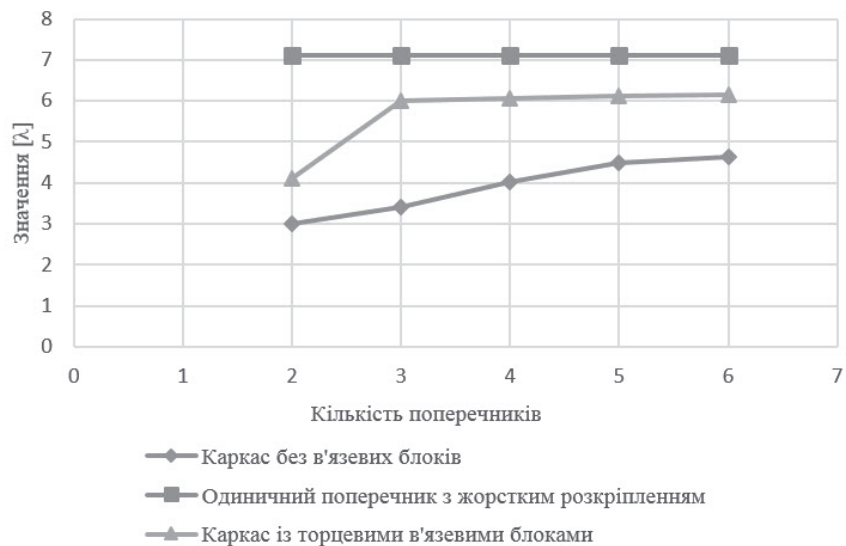


Рис.7. Графік порівняння $[\lambda]$ каркасів без в'язей та з в'язевими блоками на торцях і окремої арки з абсолютною жорсткістю точок розкріплення

Висновки. Наведені вище дослідження доводять необхідність врахування впливу на стійкість одиничних поперечників і на загальну стійкість каркасу, факторів жорсткості елементів розкріплення та кількості поперечників у поздовжньому напрямку будівлі. Це приводить до необхідності розвитку існуючих методик розрахунку на стійкість стиснуто-зігнутих елементів, а також вирішення додаткових задач, пов'язаних з визначенням впливу форми поперечного перерізу елементів розкріплення та їхньої гнучкості на стійкість як одиничних арок так і всієї будівлі в цілому. Також встановлена закономірність впливу довжини будівлі і кількості формоутворюючих аркових основних несучих елементів на просторову роботу окремих арок.

Список використаних джерел:

1. ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування - Київ: Мінрегіонбуд України, 2014 – 205 с.
2. ДБН В.2.3-14:2006 Мости та труби. Правила проектування - Київ: Мінрегіонбуд України, 2006 – 367 с.
3. Білик С.І. Рациональні сталеві каркаси малоенергоємних будівель із зварних двотаврів змінного перерізу/ С.І. Білик, Київ, 2008 – С.225-359.
4. Салимов А.Ф. Боковая устойчивость поясов решетчатых арок/ А.Ф. Салимов, Казань, 1993 – С.19-62.
5. Катюшин В.В. Здания с каркасами из стальных рам переменного сечения (расчет, проектирование, строительство) / В.В. Катюшин – М.: ОАО «Издательство «Стройиздат», 2005– С.548-582.
6. Конаков А.І. Критическая жесткость элементов, раскрепляющих сжатые стержни/А.І. Конаков, Ж. «Строительная механика и расчет сооружений». Вип.5. 1990– С.78-80.
7. Динник А.Н. Устойчивость арок/ А.Н. Динник. - Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1946 – С.19-35.
8. Динник А.Н. Устойчивость упругих систем/ А.Н. Динник. – Научно-техническое издательство НКТП, 1935 – С.52-56.
9. ANSYS Mechanical User's Guide/ ANSYS, Inc.,2013 – С.192-196.
10. Блейх Ф. Устойчивость металлических конструкций/ Блейх Ф. – М.: Госиздат физмат литературы, 1959. – 544 с.
11. Білик С.І., Усенко М.В. Про стійкість центрально-стиснутого гнутого швеллера з урахуванням розвитку пластичних деформацій/ С.І. Білик, М.В. Усенко // 36. наук. пр. Вип. 21. – Рівне. МОН України, НУВГП, 2011. – С. 136–143.
12. Нілов О.О., Пермяков В.О., Шимановський О.В., Білик С.І., Лавриненко Л.І., Белов І.Д., Володимирський В.О. Металеві конструкції. Загальний курс. – К.:Видавництво «Сталь», 2010.-869 с.
13. Билык С.И. Стальные балки, раскрепленные профилированными листовыми конструкциями / С.И. Билык // Новини науки Придніпров'я / Науково-практичний журнал / Інженерні дисципліни.,2006. – № 3. – С. 25-30