

**ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОДІЛЕННЯ НАПРУЖЕНЬ БІЛЯ ПРОМІЖНИХ  
ОПОР НЕРОЗРІЗНИХ ПЕРФОРОВАНИХ БАЛОК ЗА ДІЇ  
НЕСИМЕТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ**

**FEATURES OF STRESS DISTRIBUTION NEAR INTERMEDIATE  
SUPPORTS OF CONTINUOUS PERFORATED BEAMS UNDER THE  
ACTION OF ASYMMETRIC LOAD**

**Безнюк Л. І.**, аспірант, [orcid.org/0000-0001-6703-5062](https://orcid.org/0000-0001-6703-5062); **Романюк Є. В.**, аспірант, [orcid.org/0009-0005-6097-9788](https://orcid.org/0009-0005-6097-9788); **Романюк В. В.**, к.т.н., доцент, [orcid.org/0000-0002-2539-4654](https://orcid.org/0000-0002-2539-4654); **Супрунюк В. В.**, к.т.н., доцент, [orcid.org/0000-0001-9534-4460](https://orcid.org/0000-0001-9534-4460) (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна)

**Bezniuk L. I.**, postgraduate student, [orcid.org/0000-0001-6703-5062](https://orcid.org/0000-0001-6703-5062); **Romaniuk Y. V.**, postgraduate student, [orcid.org/0009-0005-6097-9788](https://orcid.org/0009-0005-6097-9788); **Romaniuk V. V.**, candidate of technical sciences, associate professor, [orcid.org/0000-0002-2539-4654](https://orcid.org/0000-0002-2539-4654); **Supruniuk V. V.**, candidate of technical sciences, associate professor, [orcid.org/0000-0001-9534-4460](https://orcid.org/0000-0001-9534-4460) (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine)

У результаті розрахунку методом скінчених елементів у програмному комплексі «Ліра» отримано нові дані про характер розподілення напружень для різних типів проміжних опор двопрольотних нерозрізних перфорованих балок за дії несиметричного рівномірно розподіленого навантаження різної величини. Конструкції опорних частин балок відрізняються наявністю заварених або незаварених отворів безпосередньо зліва і справа від точки обпирання балки, а також наявністю або відсутністю опорного поперечного ребра жорсткості, розміщеного по осі опори.

The purpose of the work is to study the stress-strain state of parts of continuous perforated beams located immediately to the left and right of the intermediate support under the action of an asymmetric load in the spans. Data on the stress-strain state of various types of intermediate supports of two-span continuous perforated beams with a height of 300 to 900 mm were obtained as a result of their calculation by the finite element method in the "Lira" software complex under the action of an asymmetric load uniformly distributed in the spans, the value of which is calculated from the condition of occurrence of the limit state of the 1st group in the beams, namely the loss of bearing capacity due to the achievement of the limit values of normal stresses in the calculated cross section of the beam. It was established that the design of the intermediate support for

beams of different heights, as in the case of symmetrical loading, significantly affects the values of the maximum deflections in the span of the beams and stresses in the calculated support sections of the beams. For beams with a height of 450, 600, 750 and 900 mm with various types of intermediate supports, the same regularities as for beams with a height of 300 mm are mostly preserved. Of course, the magnitudes of the calculated loads for them are greater, which also leads to greater magnitudes of stresses at the calculated points of the cross-sections. But none of these stresses exceeds the calculated resistance of the adopted C235 steel. The analysis of the deflection graphs of the loaded spans was performed by comparing them with the deflection graphs under the action of a symmetrical load in the spans. Moreover, for beams with a height of 300 to 600 mm, the deflections under the action of an asymmetric load are greater than for a symmetrical one, and only for sufficiently rigid beams with a height of 750 and 900 mm are they the same. The given analysis of the operation and stress-strain state of beams of different heights with different structural design of the supporting parts confirms the need for further numerical studies with simulation of the real conditions of bearing the beams and the real stiffness of the mounting joints on the supports.

**Ключові слова:** несиметричний, навантаження, перфорація, балка, полиця, стінка, елемент, місцевий, стійкість, напруження, несучий, здатність, опора, жорсткість, ребро.  
asymmetric, load, perforation, beam, shelf, wall, element, local, stability, stress, bearing, capacity, support, stiffness, rib.

**Вступ.** Загальні принципи проектування однопрольотних перфорованих балок, а також формули для обчислення напружень в характерних точках розрахункового перерізу з отвором наведено у чинних нормах проектування [1]. Окрім того, експериментально-теоретичному вивченню перфорованих елементів і конструкцій з їх використанням присвячено дуже багато робіт як вітчизняних, так і закордонних науковців, які досліджували різноманітні аспекти забезпечення несучої здатності, а саме міцності, загальної стійкості, місцевої стійкості окремих елементів перерізу [3-13] Але при цьому розглядалися лише однопрольотні балки. Нерозрізні багатопрольотні перфоровані балки майже не досліджувалися. У роботі [14] і у деяких інших раніше опублікованих роботах автори запропонували різні варіанти конструктивного оформлення опорних частин таких балок і виконали їх розрахунок у програмному комплексі «Ліра» за дії симетричного у прольотах навантаження. Немає сумнівів, що робота балки в цілому та її напружено-деформований стан за дії несиметричного навантаження буде суттєво відрізнятися від отриманих раніше даних.

**Постановка мети і завдань досліджень.** Метою роботи є вивчення напружено-деформованого стану частин нерозрізних перфорованих балок, що

знаходяться безпосередньо зліва і справа від проміжної опори за дії несиметричного у польотах навантаження.

Завданнями дослідження є:

– виконати необхідні розрахунки ділянок балок біля опор у програмному комплексі «Ліра»;

– побудувати епюри напружень у розрахункових перерізах перфорованих балок висотою 300, 450, 600, 750 і 900 мм, отриманих з вихідних двотаврів відповідно № 20, 30, 40, 50, 60/ДСТУ 8768:2018;

– визначити величини максимальних прогинів у балках різної висоти з різним конструктивним оформленням опорних частин.

**Методика досліджень.** Аналіз літературних джерел, що присвячені теоретичним та експериментальним дослідженням перфорованих конструкцій, зокрема їх несучій здатності, загальній стійкості та місцевій стійкості елементів перерізу, а також числові дослідження балок зазначених вище розмірів у програмному комплексі ПК «Ліра» на основі методу скінчених елементів.

**Результати досліджень.** До розгляду прийнято варіанти конструкції проміжної опорної частини нерозрізної перфорованої балки, що наведені на рис. 1, 2, 3, 4 [14]. Коефіцієнт розвитку висоти перерізу прийнято  $k = 1,5$  для всіх балок незалежно від висоти вихідного профілю, а висота отвору перфорації дорівнює половині висоти вихідного профілю. Під час моделювання балок дотримано реальні розміри з усіма конструктивними особливостями опорних частин.

Для зазначених вище висот вихідних профілів балок обчислено значення розрахункового рівномірно розподіленого навантаження за граничними станами другої групи, оскільки саме він визначає несучу здатність таких балок і які становлять відповідно  $q = 16,45; 45,22; 85,24; 142,1; 229,0$  кН/м.

У табл. 1 вибірково наведено епюри максимальних приведених напружень у 6-и розрахункових перерізах балок (рис. 1) з різними типами проміжних опор.

Для балок висотою 300 мм з типами опор 1 і 2 у перерізі 1-1 не тільки характер розподілення напружень, але і їх величини є майже однаковими. А у перерізі 2-2, розташованому ближче до точки обпирання нерозрізної балки, розподілення напружень у розрахункових точках для цих типів опор суттєво відрізняється, що можна, вочевидь, пояснити близькістю опори, по осі якої розміщене ребро жорсткості (тип 2). У перерізі 3-3 напруження у т. 9 є практично однаковими, а у т. 11, яка фактично є точкою обпирання балки на опору, напруження для опори типу 2 є у 2,25 рази меншими порівняно з опорою типу 1. Напруження у розрахункових точках перерізів 4-4 і 5-5, які є симетричними відносно осі опори перерізам відповідно 1-1 і 2-2, є більшими за величиною оскільки саме права частина нерозрізної балки є завантаженою. Напруження у розрахункових точках перерізу 6-6 є несуттєво більшими за

аналогічні напруження у розрахункових точках перерізу 3-3, що є цілком логічним. Напруження у розрахункових точках усіх перерізів в балках з типами опор 3 (із завареними отворами) і 4 (із завареними отворами і ребром жорсткості) є набагато меншими порівняно з описаними вище для типів опор 1 і 2.

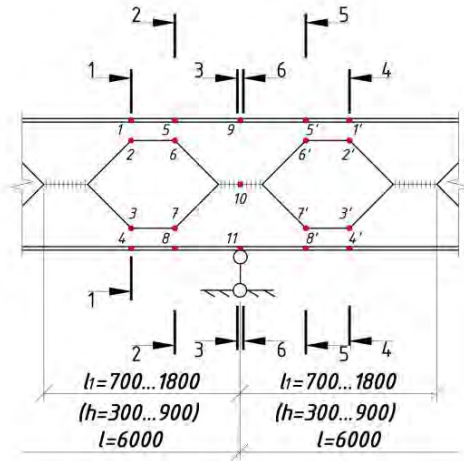


Рис. 1 Розрахункові перерізи балки біля проміжної опори

Для балок інших висот (450, 600, 750 і 900 мм) з різними типами опор переважно зберігаються ті самі закономірності, що і для балок висотою 300 мм. Звичайно, величини розрахункових навантажень для них є більшими, що зумовлює і більші величини напружень у розрахункових точках перерізів. Але жодне з цих напружень не перевищує розрахункового опору прийнятої сталі класу С235.

Аналіз графіків прогинів завантажених прольотів доцільно виконати, порівнюючи їх з графіками прогинів за дії симетричного у прольотах навантаження, що були представлені у [14].

Отже, для балок висотою 300 мм величина прогину за дії однакового навантаження  $q = 62,5$  кН/м становить 8 мм порівняно з прогином 5 мм для симетричного навантаження, тобто спостерігається збільшення прогинів у 1,6 рази, що можна пояснити відсутністю навантаження зліва і внаслідок цього відсутністю стабілізуючого ефекту лівої частини нерозрізної балки. Причому характер зростання деформацій в обох випадках є абсолютно однаковим.

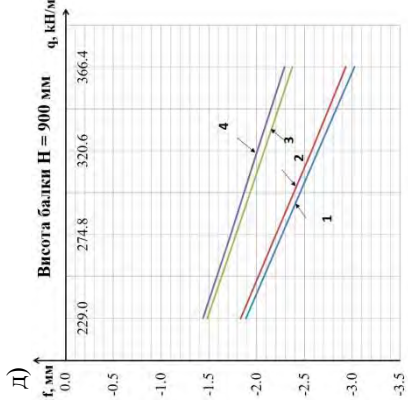
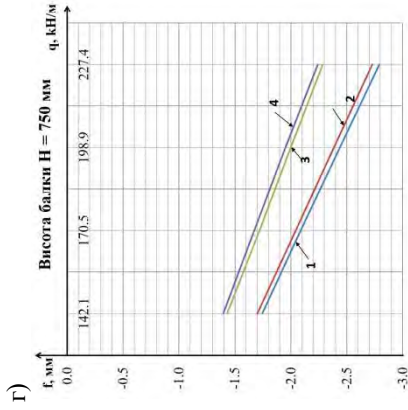
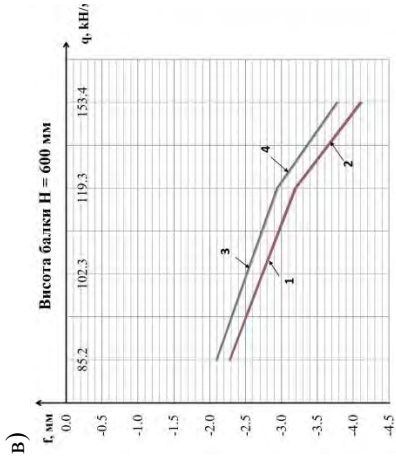
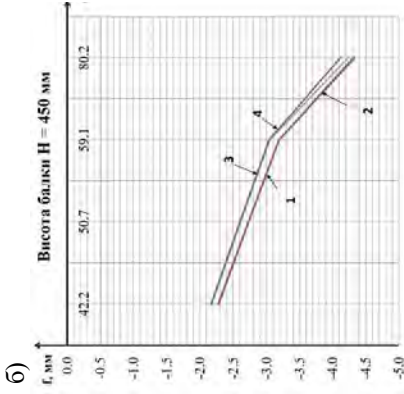
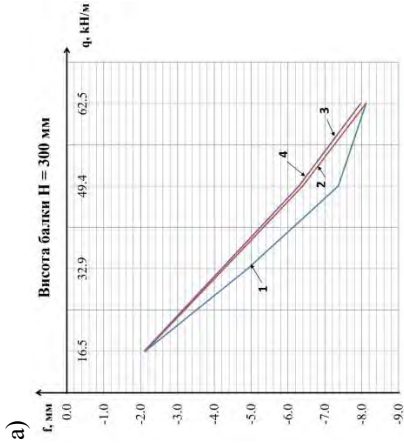
Таблиця 1

## Епюри максимальних приведених напружень, МПа

Висота балки/ Тип опори	Перерізи						
	1-1	2-2	3-3	4-4	5-5	6-6	6-6
1	2	3	4	5	6	7	7
300/1 (2)							
300/3 (4)							
450/1 (2)							

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
600/1 (2)						
750/1 (2)						
900/1 (2)						



**Рис. 2.** Прогини у навантажених прольотах нерозрізних перфорованих балок висотою:

а – 300 мм; б – 450 мм;

в – 600 мм; г – 750 мм;

д – 900 мм

Примітки: 1. Нумерацію типів опор наведено відповідно до рис. 1, 2, 3 і 4 [14]. 2. Значення навантажень 62,54; 80,2; 153,4; 227,4 і 366,4 кН/м є максимальними для відповідних перфорованих балок з розрахунку за граничними станами I-ої групи.

Так само, як і для балок висотою 300 мм, для балок висотою 450 мм прогини за дії несиметричного навантаження є більшими. Щоправда це збільшення становить близько 1,4 рази. Для балок висотою 600 мм також фіксується збільшення прогинів, що становить близько 1,3 рази. І лише для балок висотою 750 і 900 мм прогини є однаковими незалежно від характеру прикладання навантаження – симетричне чи несиметричне.

**Висновки та рекомендації.** 1. Отримано дані про напружено-деформований стан різних типів проміжних опор двопрольотних нерозрізних перфорованих балок висотою від 300 до 900 мм у результаті їх розрахунку методом скінчених елементів у програмному комплексі «Ліра» за дії несиметричного у прольотах рівномірно розподіленого навантаження, величину якого обчислено з умов виникнення в балках граничного стану 1-ої групи, а саме втрати несучої здатності за досягнення у розрахунковому поперечному перерізі балки граничних значень нормальних напружень.

2. Встановлено, що конструктивне оформлення проміжної опори для балок різної висоти, як і у випадку з симетричним навантаженням, суттєво впливає на величини максимальних прогинів у прольоті балок і напружень в опорних перерізах балок. Причому для балок висотою від 300 до 600 мм прогини за дії несиметричного навантаження є більшими, ніж для симетричного, і лише для достатньо жорстких балок висотою 750 і 900 мм вони є однаковими.

3. Наведений аналіз роботи та напружено-деформованого стану балок різної висоти з різним конструктивним оформленням опорних частин підтверджує необхідність проведення подальших числових досліджень з моделюванням реальних умов обпирання балок та реальної жорсткості монтажних з'єднань на опорах.

1. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування [Чинний від 2015-01-01]. Київ : Мінрегіон України, 2014. 198 с. (Державні будівельні норми України).

DBN V.2.6 – 198: 2014. Stalevi konstruktsiyi. Normy proektuvannya [Chynnyu vid 2015-01-01]. Kyiv : Minrehion Ukrayiny, 2014. 198 s. (Derzhavni budivel'ni normy Ukrayiny).

2. Eurocode 3, 2005: Design of steel structures. EN 1993-1-8:2005.

3. Chung K.F. et al. Steel beams with large web openings of various shapes and sizes: an empirical design method using a generalized moment-shear interaction, *The Journal of Constructional Steel Research*, 2003. Vol. 59. pp. 117-1200.

4. Tsavdaridis K.D., D'Mello C. Vierendeel Bending Study of Perforated Steel Beams with Various Novel Shapes of Web Openings, through Non-linear Finite Element Analyses”, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 2011, 138 (10). pp. 1214 – 1230.

5. Tsavdaridis K.D., D'Mello C. Web Buckling Study of the Behaviour and Strength of Perforated Steel Beams with Different Novel Web Opening Shapes”. *The Journal of Constructional Steel Research*. 2011. Vol. 67, Issue 10. pp. 1605-1620.

6. Романюк В. В., Супрунюк В. В. Міцність та деформативність перфорованих елементів сталеві арки: монографія. Рівне: НУВГП, 2013. 106 с.

Romaniuk V. V., Supruniuk V. V. Mitsnist' ta deformatyvnist' perforovanykh elementiv stalevoyi arky: monohrafiya. Rivne: NUVHP, 2013. 106 s.



7. Романюк В. В., Василенко В. Б., Супрунюк В. В. Несуча здатність перфорованих прогонів Z-подібного профілю за косоого згину: монографія. Рівне: НУВГП, 2017. 206 с.  
Romaniuk V. V., Vasylenko V. B., Supruniuk V. V. Nesucha zdatnist' perforovanykh prohoniv Z-podibnoho profilu za kosoho zhyynu: monohrafiya. Rivne: NUVHP, 2017. 206 s.
8. Romaniuk V. et al. Determination of rigidity of node bolt joints. *AIP Conference Proceedings*. Volume 2678, Issue 1. 020016, 2023.
9. Romaniuk V., Supruniuk V. Influence of Flexibility of Bolted Joints on Rigidity of the Hingeless Frame. Proceedings of EcoComfort 2020. EcoComfort 2020. *Lecture Notes in Civil Engineering*. Vol. 100. 371–377. Springer, Cham, 2021.
10. Xue-Chun Liu. et al. Tension–bend–shear capacity of bolted-flange connection for square steel tube column. *Engineering Structures*, Volume 20115, Article 109798, 2019.
11. Farshad Hashemi Rezvani, Hamid Ronagh. Span length effect on alternate load path capacity of welded unreinforced flange-bolted web connections. *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 138. Pages 714–728, 2017.
12. Jia Wang et al. Behaviour and design of demountable beam-to-column composite bolted joints with extended end-plates. *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 144. Pages 221–235, 2018.
13. M. P. Son. Experimental determination of yield in beam-to-column flange connections. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 687, Issue 3, 2018.
14. Безнюк Л.І., Романюк С.В., Романюк В.В., Супрунюк В.В. Напружено-деформований стан нерозрізних перфорованих балок біля проміжних опор за дії симметричного у прольотах навантаження. Збірник наукових праць. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне : НУВГП, 2024. Випуск 45. С. 116 – 125.  
Bezniuk L.I., Romaniuk Y.V., Romaniuk V.V., Supruniuk V.V. Napruzhenodeformovanyu stan nerozriznykh perforovanykh balok bilya promizhnykh opor za diyi symmetrychnoho u prol'otakh navantazhennya. Zbirnyk naukovykh prats'. *Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudy*. Rivne : NUVHP, 2024. Vypusk 45. S. 116 – 125.