

# Розрахунок вузлів монолітних рам з напруженою арматурою на бетон в розрахунковому комплексі «ЛІРА-САПР»

Олександр Козак

Київський національний університет будівництва і архітектури  
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037  
[130788kozak@gmail.com](mailto:130788kozak@gmail.com), [orcid.org/0000-0002-0025-6554](https://orcid.org/0000-0002-0025-6554)

DOI: 10.32347/2522-4182.5.2019.32-38

**Анотація.** Напружено-деформований стан похилих перерізів залишається мало вивченим (в порівнянні з нормальними перерізами), підтвердження чого є відсутність єдиної методики розрахунку, яка б враховувала всі фактори, що впливають на роботу залізобетонних елементів при одночасній дії згинального моменту, поперечної та поздовжньої сили.

Попереднє напруження може здійснюватися як зі зчепленням напруженої арматури з бетоном, так і без нього. Відмінність технології постнапруження від широко відомого попереднього напруження (здійснюваного в умовах заводу ЗБВ), полягає в тому, що напружена арматура натягується після бетонування і набору бетоном достатньої передаточної міцності (приблизно 70-80% марочної міцності). Для забезпечення можливості натягу арматури, після твердіння бетону, вона повинна мати можливість вільного переміщення в бетоні. Для цього напружена арматура поміщується в канали (із металевих або пластикових труб). Передача зусиль на бетон здійснюється за допомогою встановлених на кінцях елементів анкерних пристроїв. Як правило, для попереднього напруження використовуються арматурні канати, що влаштовуються в конструкціях між верхньою й нижньою сіткою арматур відповідно до форми епюри згинальних моментів (лінією головних розтягуючих зусиль). При натягу канатів виникають напруження обтиску бетону (від сили натягу  $P$ ) та розвантажувальне зусилля (реактивний тиск), що змінює свій напрямок на опорах в нерозрізних конструкціях.

Розрахунок опорних вузлів із криволінійною напруженою арматурою є досить важливим при проектуванні даних конструкцій. Одним із важливих питань є правильне моделювання таких



**Олександр Козак**  
асистент кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій  
к.т.н.

вузлів у розрахункових комплексах для отримання достовірних результатів (напружень та переміщень).

**Ключові слова.** Похилі перерізи, несуча здатність, попередньо-напружена арматура, криволінійна попередньо-напружена арматура, натяг на бетон, розрахункова модель.

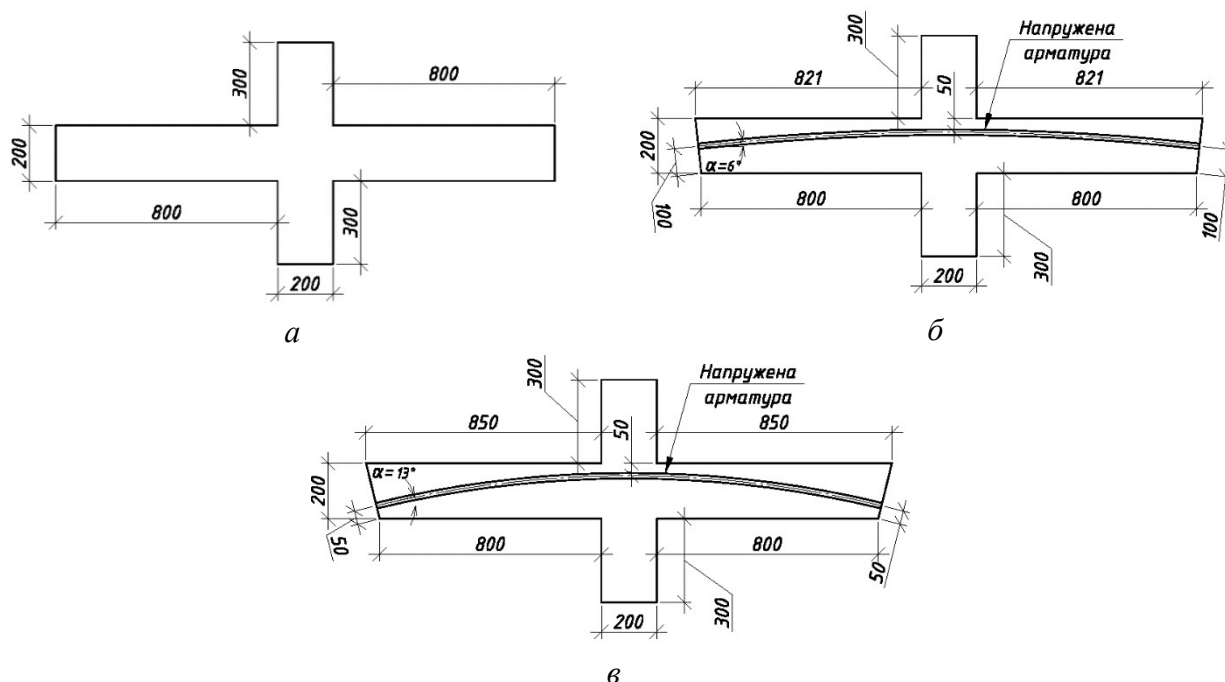
## ВСТУП

Об'єктом дослідження являються залізобетонні вузли монолітних рам та нерозрізних балок із напруженою криволінійною арматурою без зчеплення з бетоном.

Для проведення експериментальних досліджень були запроектовані та виготовлені монолітні проміжні вузли нерозрізної балки (вузол спряження балок з колоною). Виготовлені три серії зразків із різним розміщенням попередньо напруженої арматури:

- серія КБ-1 – без попередньо напруженої арматури;
- серія КБ-2 – із криволінійною напруженою арматурою (кут нахилу арматури  $\alpha=6^\circ$ );
- серія КБ-3 – із криволінійною напруженою арматурою (кут нахилу арматури  $\alpha=13^\circ$ ).

Геометричні параметри зразків із розміщенням напруженої арматури зображені на рис.1.



**Рис.1.** Геометричні характеристики дослідних зразків: а) серія КБ-1; б) серія КБ-2; в) серія КБ-3  
**Fig.1.** Geometric characteristics of prototypes: а) type KB-1; б) type KB-21; в) type KB-3

Основне армування всіх серій зразків – ідентичне. Просторовий каркас утворений двома горизонтальними та двома вертикальними плоскими каркасами. Поздовжня верхня (робоча) арматура зразків –  $\varnothing 20A400C$ , конструктивна –  $\varnothing 6A240C$ , поперечна арматура –  $\varnothing 4Bp$ -з кроком 150 мм. Всі каркаси – зварні, виготовлені в заводських умовах. В якості напружуваної криволінійної арматури використовувався канат подвійної завивки  $\varnothing 15$  мм згідно ГОСТ 7668-80. Канат поміщався в пластикову трубу ( $\varnothing 20$  мм), попередньо забетоновану в зразку. Для забезпечення міцності зон анкерування попередньо напруженої арматури, додатково (по обидва кінці напружуваної арматури) влаштовані пружні спіралі із арматури  $\varnothing 4Bp$ -I (рис. 2.4). Основне армування всіх серій зразків – ідентичне (рис. 2.3). Просторовий каркас утворений двома горизонтальними та двома вертикальними плоскими каркасами. Поздовжня верхня (робоча) арматура зразків –  $\varnothing 20A400C$ , конструктивна –  $\varnothing 6A240C$ , поперечна арматура –  $\varnothing 4Bp$ -з кроком 150 мм. Всі каркаси – зварні, виготовлені в заводських умовах. В якості напружуваної криволінійної арматури використовувався канат подвійної завивки  $\varnothing 15$  мм згідно ГОСТ 7668-80. Канат поміщався в пластикову трубу ( $\varnothing 20$  мм), попередньо забетоновану в зразку. Для забезпечення міцності зон анкерування попередньо напруженої арматури, додатково (по обидва кінці на-

пружуваної арматури) влаштовані пружні спіралі із арматури  $\varnothing 4Bp$ -I.

## МЕТА І МЕТОДИ

Основна мета – моделювання дослідних зразків у розрахунковому комплексі “ПК ЛІРА-САПР 2018” та порівняти отримані дані із результатами експериментальних досліджень.

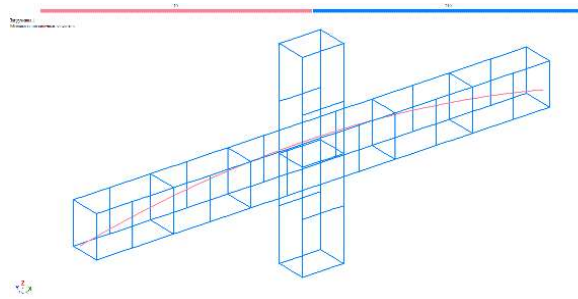
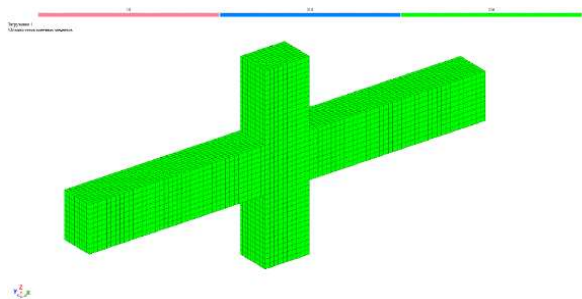
## ОСНОВНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для моделювання розрахункових схем дослідних зразків з подальшою їх перевіркою із результатами експериментальних досліджень використали розрахунковий комплекс “ПК ЛІРА-САПР 2018”. В основу даної програми закладений розрахунок конструкції методом скінчених елементів з можливістю врахування фізичної та геометричної нелінійності.

Для аналізу напружено-деформованого стану, дослідні зразки були розбиті на об’ємні скінчені елементи із врахуванням геометричних та фізичних характеристик.

Робота бетону змодельована фізично нелінійними об'ємними скінченними елементами типу КЭ-236 (рис. 2). Поздовжня та поперечна арматура змодельована фізично нелінійними

стержневими скінченними елементами типу КЭ-210 (рис. 2). Попередньо напружена арматура задана за допомогою стержневих скінченних елементів КЭ-10 (рис. 2).



**Рис.2.** Схеми типів скінченних елементів для дослідних зразків  
**Fig.2.** Schemes of finite element types for prototypes

В результаті усіх моделювань матеріалів отримали 14641 вузлів та 12920 елементів для зразків серії КБ-1 (без попередньо напруженої арматури), а для зразків серій КБ-2 та КБ-3 (із напруженою арматурою) – 14732 вузлів та 13010 елементів.

Характеристики бетону та арматури (напруженої та звичайної) прийняті згідно результатів випробувань матеріалів, із врахуванням нелінійної роботи: для бетону використано 21-й експоненціальний закон деформування бетону, а для арматури 15-й – експоненціальний закон деформування сталі. Ці два закони дають можливість врахувати сумісну роботу двох матеріалів.

Попереднє напруження змодельоване за допомогою різниці температур стержня (рис. 4.6, б). Згідно із методикою, різницю температур визначають за формулою:

$$t_1 - t_2 = -\frac{\varepsilon_0}{\alpha}, \quad (1)$$

Зразки серії КБ-1 (без напруженої арматури) розраховувався на два навантаження: власна вага балки та корисне навантаження на кожен край балки у відповідності до схеми випробування зразків.

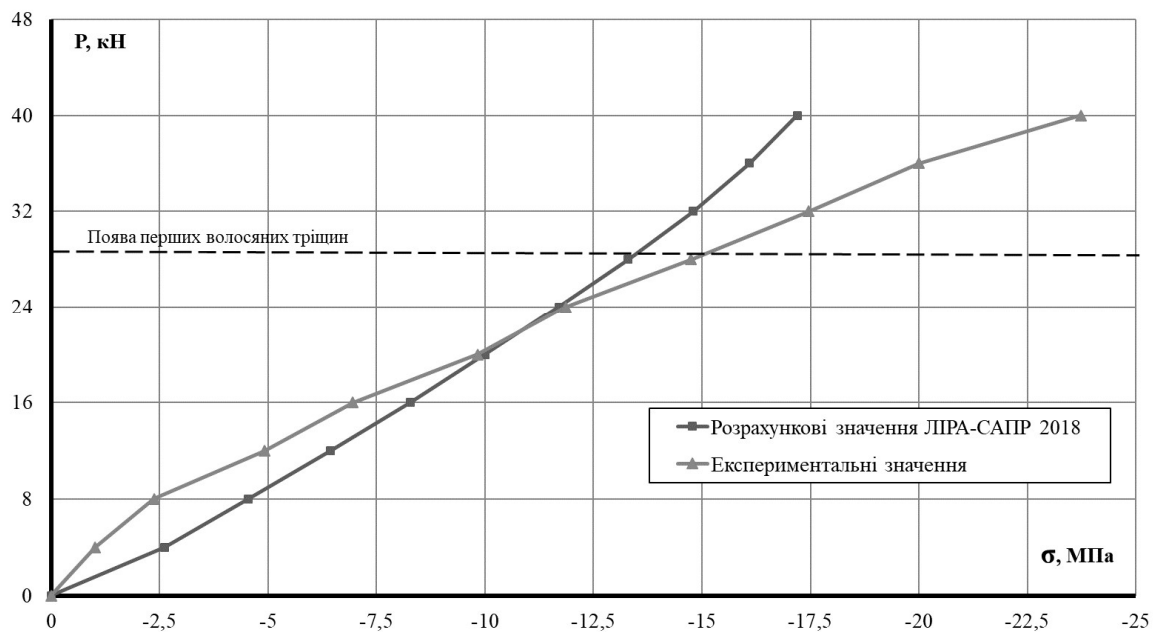
Зразки серії КБ-2 та КБ-3 (із криволінійною напруженою арматурою) розраховувався на три

навантаження: власна вага балки, попереднє напруження канату та корисне навантаження.

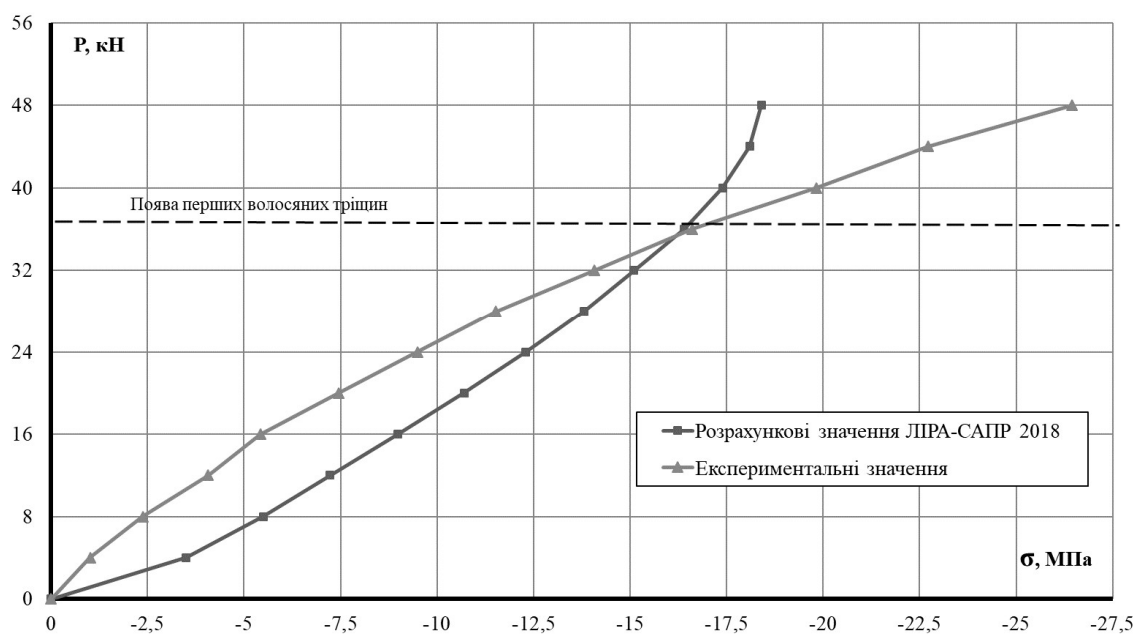
Моделювання нелінійного навантаження виконане наступним чином: для зразків серії КБ-1 на першому етапі завантаження діє власна вага конструкцій, а на другому етапі – корисне навантаження; для зразків серії КБ-2 та КБ-3 на першому етапі завантаження діє власна вага конструкцій, на другому етапі – зусилля попереднього напруження, а на третьому етапі – корисне навантаження. Для розрахунку використовувався кроковий метод розрахунку, тому кожне навантаження прикладалося ступенями: власна вага – 10 рівномірних кроків, попереднє напруження – 10 рівномірних кроків, корисне навантаження – 20 рівномірних кроків (один крок величиною 4 кН).

За результатами розрахунків отримані мозаїки напружень в бетоні на кожній ступені навантаження.

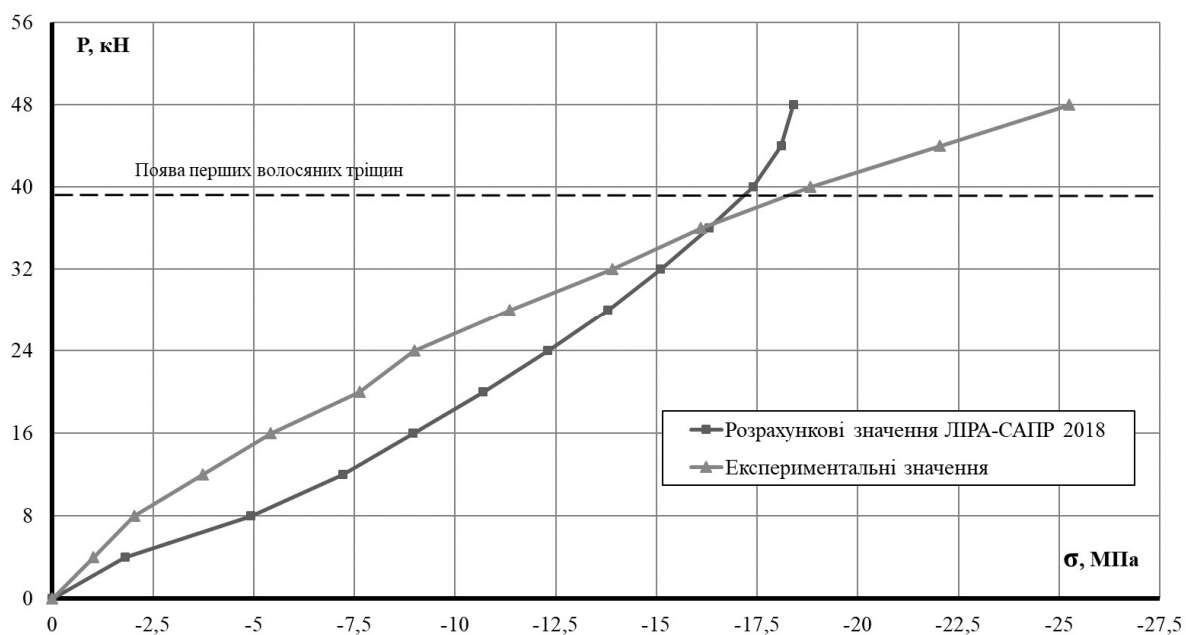
Для аналізу та порівняння результатів розрахунків в «ПК ЛІРА-САПР 2018» із експериментальними даними побудовані графіки залежності напружень в стиснутій зоні бетону від навантажень.



**Рис.3.** Графік середніх значень напружень стиснутої зони бетону дослідних зразків серії КБ-1  
**Fig.3.** Graph of the average stresses of the compressed zone of concrete samples of the KB-1 series



**Рис.4.** Графік середніх значень напружень стиснутої зони бетону дослідних зразків серії КБ-2  
**Fig.4.** Graph of the average stresses of the compressed zone of concrete samples of the KB-2 series

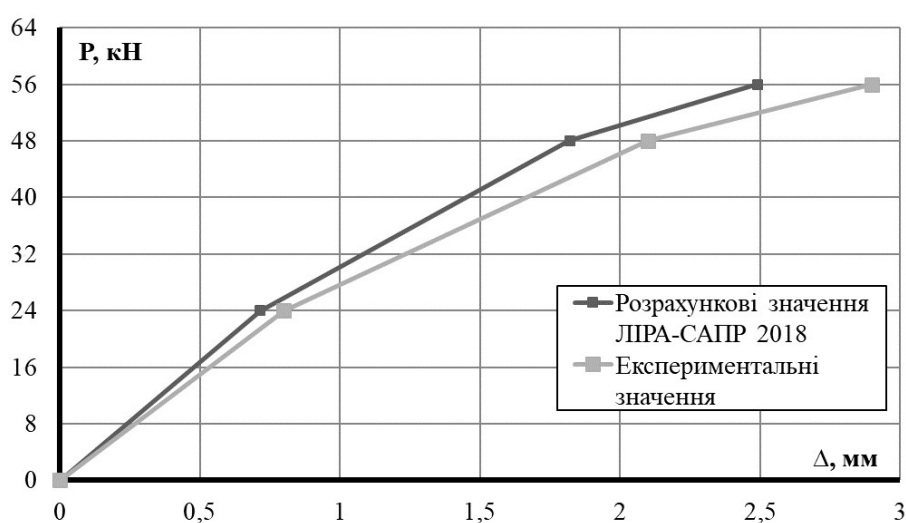


**Рис.5.** Графік середніх значень напружень стиснутої зони бетону дослідних зразків серії КБ-3  
**Fig.5.** Graph of the average stresses of the compressed zone of concrete samples of the KB-3 series

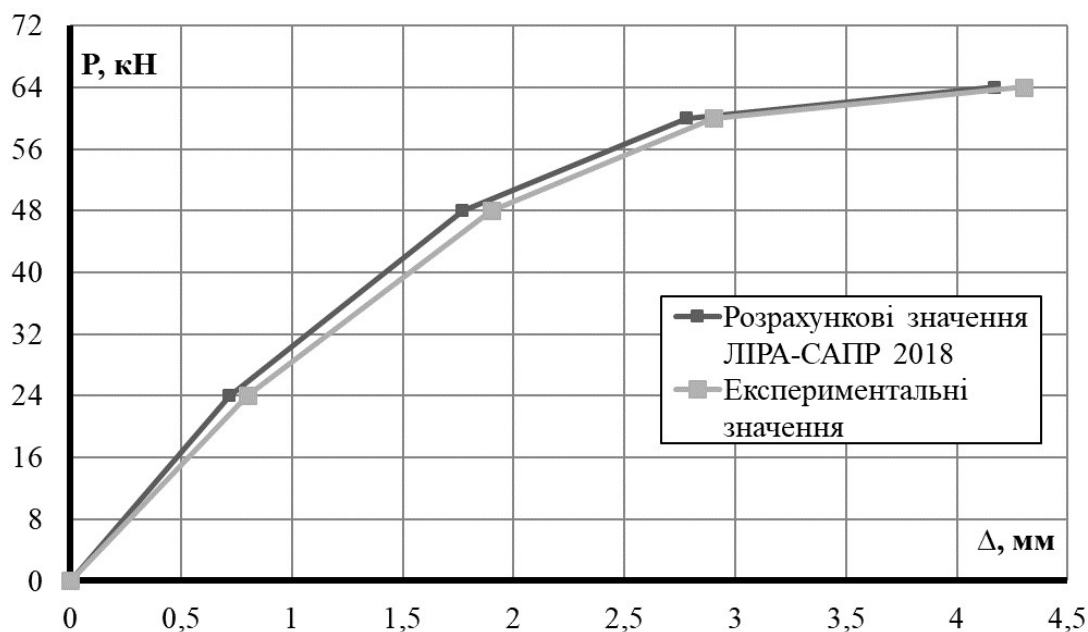
При аналізі графіків зміни напружень в бетоні стиснутої зони є значні розбіжності між експериментальними значеннями та розрахунковими. Це пояснюється тим, що розрахункові значення напружень брались для крайніх скінчених елементів, а експериментальні значення напружень визначались на відстані 50 мм від грані. Розходження графіків після появи перших тріщин говорить про те, що «ПК ЛІРА-САПР 2018» дає дуже занижені результати.

За результатами розрахунків отримані мозаїки прогинів (переміщень) дослідних зразків на кожній ступені навантаження.

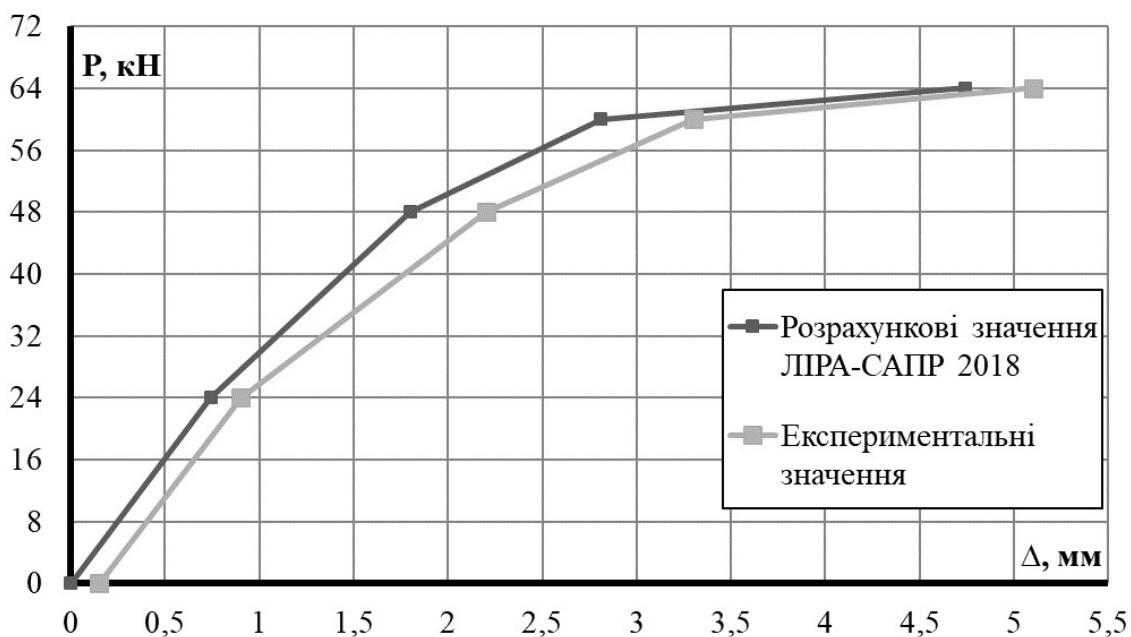
Для аналізу та порівняння результатів розрахунків в «ПК ЛІРА-САПР 2018» із експериментальними даними побудовані графіки залежності переміщень дослідних зразків від навантажень.



**Рис.6.** Графік середніх значень прогинів (переміщень) дослідних зразків серії КБ-1  
**Fig.6.** Graph of average values of deflections (displacements) of prototypes of the KB-1 series



**Рис.7.** Графік середніх значень прогинів (переміщень) дослідних зразків серії КБ-2  
**Fig.7.** Graph of average values of deflections (displacements) of prototypes of the KB-2 series



**Рис.8.** Графік середніх значень прогинів (переміщень) дослідних зразків серії КБ-1  
**Fig.8.** Graph of average values of deflections (displacements) of prototypes of the KB-1 series

Аналіз графіків прогинів (переміщень) дослідних зразків показав достатньо добру збіжність розрахункових та експериментальних даних. Максимальне відхилення становить 16,2 %.

#### ВИСНОВКИ

Для порівняння експериментальних даних виконаний теоретичний розрахунок дослідних зразків в «ПК ЛІРА-САПР 2018» з урахуванням

фізичної нелінійності. Результати розрахунку дали достатньо добру збіжність з експериментальними даними. Проте після появи тріщин «ПК ЛІРА-САПР 2018» дає дуже занижені значення напружень в бетоні стиснутої зони та в напруженій арматурі.

1. **Baker A. Ahmada** A statically indeterminate truss mechanism for reinforced concrete beams, failing by shear. Bulletin d'Information CEB. – Paris, – №40. – 1964.
2. **O. Kozak, O. Zhuravskiy, M. Delyavskyy.** Effect of the pre-stressed reinforcement curvature on the bearing capacity of inclined sections of monolithic. Cite as: AIP Conference Proceedings 2077, 020027 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5091888> Published Online: 21 February 2019.
3. **Regan P.** Shear in reinforced concrete (an experimental study). A report to the construction industry research and information association. – London, 1971.
4. **Taerve L.** Codes and Regulations Utilisation of High Strength. High Performance Concrete. – 4-th Int. Sump. – Paris, 1996. – P.93-100.
5. **Vandewalle.** Recommendations of RILEM TC162-TDF: 'Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete: a-s-design method' (final recommendation), Mater. Struct. 36 (2003) 560-567.

#### REFERENCES

1. **Baker A. Ahmada** A statically indeterminate truss mechanism for reinforced concrete beams, failing by shear. Bulletin d'Information CEB. – Paris, – №40. – 1964.
2. **O. Kozak, O. Zhuravskiy, M. Delyavskyy.** Effect of the pre-stressed reinforcement curvature on the bearing capacity of inclined sections of monolithic. Cite as: AIP Conference Proceedings 2077, 020027 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5091888> Published Online: 21 February 2019.
3. **Regan P.** Shear in reinforced concrete (an experimental study). A report to the construction industry research and information association. – London, 1971.
4. **Taerve L.** Codes and Regulations Utilisation of High Strength. High Performance Concrete. – 4-th Int. Sump. – Paris, 1996. – P.93-100.
5. **Vandewalle.** Recommendations of RILEM TC162-TDF: 'Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete: a-s-design method' (final recommendation), Mater. Struct. 36 (2003) 560-567.

#### Calculation of nodes of monolithic frames with reinforcement stressed on concrete in the settlement complex "LIRA-CAD"

*Oleksandr Kozak*

**Summary.** The stress-strain state of sloping cross-sections remains poorly understood (in comparison with normal cross-sections), which is confirmed by the absence of a single method of calculation that would take into account all factors affecting the operation of reinforced concrete elements with simultaneous bending moment, action and longitudinal force.

Pre-tensioning can be carried out both with and without adhesion of a stressed reinforcement with concrete. The difference between the post-tension technology and the widely known pre-stress (carried out in the conditions of the WB plant) is that the stressed reinforcement is tensioned after concreting and concrete with sufficient transfer strength (approximately 70-80% of brand strength). To ensure that the tension of the reinforcement is possible, after the concrete has hardened, it must be able to move freely in the concrete. For this purpose, on-elastic fittings are placed in channels (made of metal or plastic pipes). Efforts on concrete are made by means of the anchor devices installed at the ends. Typically, prestresses use arm-tour ropes arranged in structures between the upper and lower meshes of the arm-tour according to the shape of the plot of bending moments (line of the main tensile forces). When tensioning the ropes, the tension of the compression of the concrete (from the force of tension P) and the unloading force (reactive pressure) arise, which changes its direction on the supports in non-different structures.

The calculation of the support units with curvilinear tension reinforcement is very important when designing these structures. One of the important issues is the proper modeling of such nodes in computational complexes to obtain reliable results (stresses and displacements).

**Key words.** inclined sections, pre-stressed reinforcement, pre-stressed curved reinforcement steel, post-tensioning, without adhesion to concrete, continuous beam, monolithic frames