

О.О. ЯРЕМЕНКО

Одеська державна академія будівництва і архітектури  
Н.О. ЯРЕМЕНКО, І.М. МИРОНЕНКО  
Одеський національний морський університет

## ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНІ ЗАЛІЗОБЕТОННІ КЕСОННІ ПЕРЕКРИТТЯ

Плоскі залізобетонні перекриття є найбільш поширеними елементами будівель та споруд. Вони часто використовуються в будівництві. В роботі виконано розрахунок збірно-монолітного кесонного перекриття торгового залу з квадратними кесонами. Балки перекриття збірні переднапружені. Характеристики досліджуваної моделі надані в статті. Розрахунок зроблений за допомогою комп'ютерної програми, яка чисельно реалізує завдання розрахунку залізобетонних ростверків на основі просторової розрахункової схеми з урахуванням фізичної нелінійності. Під час розрахунку програмний комплекс враховує повзучість бетону в умові стирання кесона по контуру, попереднє напруження арматури балок одного з напрямків. Наведено результатів комп'ютерних досліджень моделі. Розглянуто експериментальні дані. Встановлено, що розрахункові дані відповідають експериментальним.

Ключові слова: кесон, попереднє напруження, арматура, прогин перекриття, рівномірне навантаження, тріщини.

O.O. YAREMENKO

Odessa State Academy of Construction and Architecture  
N.O. YAREMENKO, I.N. MIRONENKO  
Odessa National Maritime University

## PRELIMINARY STRESSED REINFORCED CONCRETE CAISSON SLABS

Cross beam systems are widely used in construction. They are used in bridge construction, industrial, civil and hydraulic engineering. Flat reinforced concrete floors are the most common elements of various buildings and structures. The use of engineering software systems that take into account new methods and algorithms for calculating the stress-strain state and the bearing capacity of reinforced concrete beams and transverse systems is an actual area of work. In the work, the calculation of the precast-monolithic caisson floor of the trading floor with square caissons is performed. Prefabricated floor beams. Characteristics of the studied model are given in the article. The calculation was performed using a computer program that numerically implements the tasks of calculating reinforced concrete grillages based on a spatial calculation scheme taking into account physical nonlinearity. In the calculation, the software package takes into account the creep of concrete, the condition of supporting the caisson along the contour, the prestressing of the reinforcement of the beams of one of the directions. The rigidity of the floor beams in areas with cracks is determined according to building codes. The stiffness of the beams in areas without cracks is determined by a formula that takes into account the long-term creep of concrete. The results of computer studies of the caisson floor model are presented. Experimental data are considered. As a result of the calculation, it was found that the calculated deflections correspond to the experimental data. The effectiveness of the constructive solution of the horizontal and monochromatic caissons with the short front spacing ribs, which is free and tightened and three.

Keywords: caisson, prestressing, reinforcement, floor deflection, uniform load, cracks.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

Системи перехресних балок поширені в будівництві, а саме промисловому, цивільному, гідротехнічному і в мостобудуванні.

Плоскі залізобетонні перекриття – найбільш поширені елементи будівель і споруд. Всі плоскі перекриття можна поділити на два основних типи: балкові і безбалкові. Балкові перекриття включають балки, які йдуть в одному або двох напрямках. На них спираються плити. У безбалкових перекриттях балки відсутні. Плити таких перекриттів спираються на колони. Колони часто мають у своїй верхній частині розширення – капітелі. Залежно від способу зведення перекриття бувають збірними, монолітними і збірно-монолітними. Застосовують, в основному, збірні і збірно-монолітні перекриття.

У зв'язку зі зростанням вимог до архітектури цивільних будівель, підвищенням якості забудови міст, удосконалюються архітектурно-планувальні рішення. Переходять від традиційних схем будівель і споруд прямокутної форми, в яких перекриття працюють за найпростішою схемою балок і плит, до більш складних плоских і просторових систем. З цієї точки зору для цивільних і промислових будівель при великих прольотах і навантаженнях представляє інтерес застосування перехресних систем і конструкцій у вигляді кесонних перекриттів зі звичайного і попередньо напруженого залізобетону, та удосконалення їх розрахунку за допомогою програмних комплексів.

### Аналіз публікацій

Теорія розрахунку перехресних балок в пружній стадії почала активно розвиватися з початку двадцятого століття. Пов'язано це з необхідністю розрахунку мостів, перекриттів різних споруд. Першим цю теорію виклав відомий вчений – академік І. Г. Бубнов [1]. Ним була запропонована система звичайних диференціальних рівнянь вигину ортогональних перехресних балок і дана методика її розв'язку. Якщо перекриття містить  $n$  перехресних зв'язків, І. Г. Бубнов зводить проблему до вирішення системи  $n$  диференціальних рівнянь. В ході її вирішення він розділяє систему на незалежні рівняння за допомогою введення в якості невідомих функцій, що представляють собою лінійні комбінації функцій прогинів перехресних зв'язків. За знайденими прогинами знаходять згинальні моменти і перерізуєчі сили. При

виведенні системи диференціальних рівнянь вважалось, що все розподілене по площі перекриття зовнішнє навантаження сприймається балками головного напрямку, а балки іншого напрямку завантажені тільки реакціями взаємодії з балками головного напрямку. Теорія знайшла своє продовження в роботах П. Ф. Папковича [2, 3]. Він запропонував більш простий метод рішення системи диференціальних рівнянь, так званий метод «головних вигинів». Широкі можливості для дослідження роботи систем перехресних балок надає використання сучасних інженерних програм. Але під час розрахунку кесонних перекриттів виникає необхідність верифікації отриманих результатів, оскільки матеріал цих конструкцій – залізобетон – володіє певною специфікою.

**Виділення невіршених частин загальної проблеми**

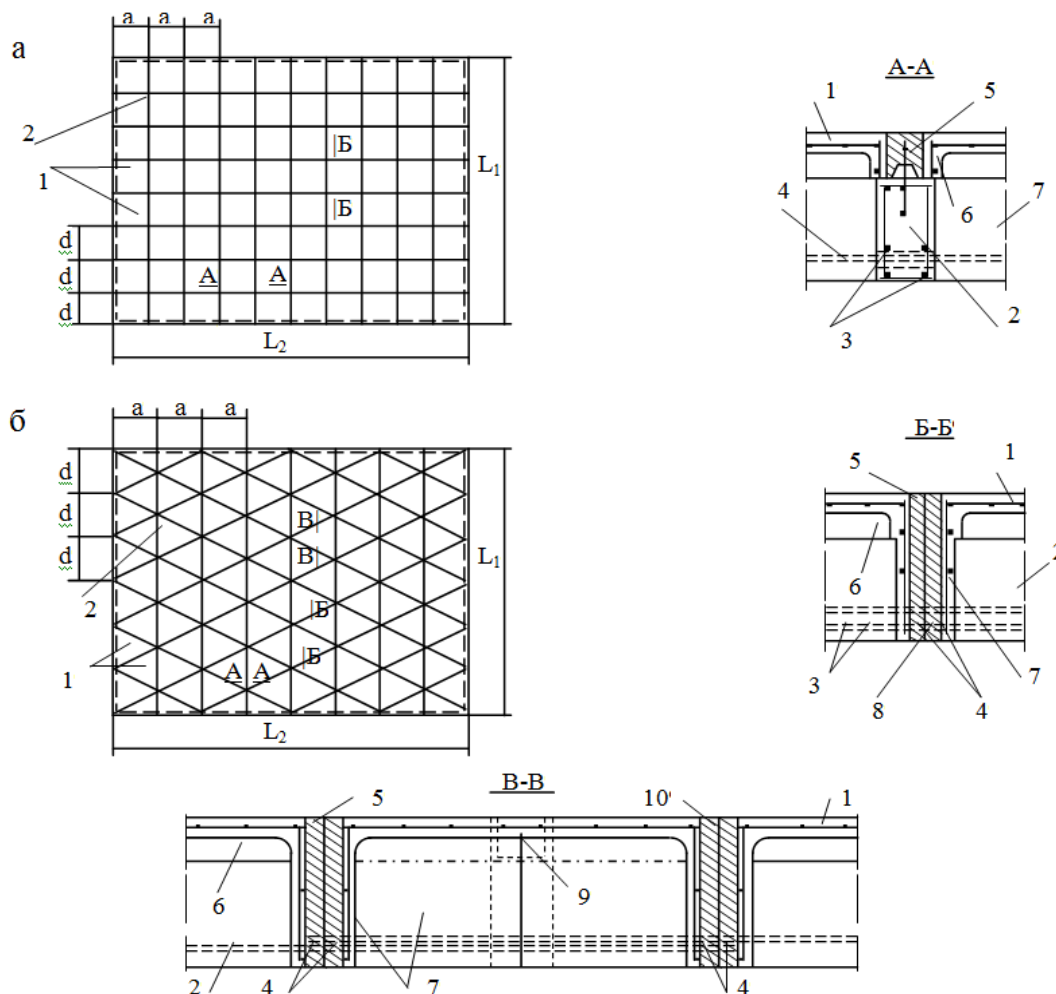
Застосування інженерних програмних комплексів, які враховують нові методи і алгоритми для проведення розрахунків напружено-деформованого стану та несучої здатності залізобетонних балок і систем перехресних балок є актуальним напрямком роботи. Програмні комплекси, які реалізують розрахункові задачі, повинні повністю відображати просторовий характер роботи залізобетонних конструкцій, пошкодження елементів конструкцій, а також враховувати нелінійний характер деформування матеріалів. Для реалізації такого алгоритму, авторами розроблена комп'ютерна програма RUSZT-KRSSON [4], написана на Delphi. Дана програма урахує повзучість бетону, попереднє напруження арматур балок одного з напрямків і умов спирання по контуру кесона. Також зроблений розрахунок даної моделі за допомогою комп'ютерної програми ANSYS.

**Цілі**

Розвиток комп'ютерних методів розрахунку і аналізу напружено-деформованого стану систем перехресних залізобетонних балок при короткочасному і тривалому дії рівномірного навантаження.

**Виклад основного матеріалу дослідження**

Розроблені і впроваджені в практику будівництва системи перехресних балок у вигляді збірно-монолітних кесонних перекриттів (СМКП) з тонкостінних коробчастих елементів, між ребрами яких встановлюється звичайна або попередньо напружена арматура [5, 6].



**Рис. 1. Конструктивні схеми попередньо напружених збірно-монолітних кесонних перекриттів:**

а – з прямокутними кесонами; б – з трикутними кесонами; 1 – ребристі прямокутні або трикутні плити; 2 – збірні переднапружені балки; 3 – напружена арматура балок; 4 – робоча арматура монолітних балок; 5 – бетон замоноличування балок і плит; 6 – низькі ребра плит; 7 – високі ребра плит; 8 – отвори для пропуску арматури монолітних балок; 9 – кутові консолі трикутних плит; 10 – каркаси арматури монолітних балок

Ці конструкції призначені для багатопверхових будівель з прольотами більше 9–12 м. Їх роблять з двох видів збірних залізобетонних елементів (рис. 1): попередньо напружених балок прямокутного перерізу і ребристих плит квадратної або трикутної форми з розмірами сторін 1,5; 2,0 і 3,0 м. Плити по контуру мають низькі ребра для установки на збірні балки і високі ребра, що проходять вниз між збірними балками для утворення бічної опалубки монолітних балок інших напрямків. Після монтажу, додаткового армування і замонолічування збірних елементів утворюються перехресні системи з балками в двох або трьох напрямках. У таких системах збірні попередньо напружені балки, встановлені в одному, більш короткому напрямку, замонолічують зверху бетоном з низькими ребрами плит, а монолітні балки інших напрямків (між високими ребрами плит) замонолічують бетоном на всю висоту. Робоча арматура монолітних балок у вигляді окремих стрижнів або пучків пропускається між високими ребрами плит через отвори, передбачені в збірних балках. Монолітні балки додатково армуються каркасами, стики яких виконуються внахлест над збірними балками в вузлах. Опалубка для замонолічування перекриттів встановлюється у вигляді інвентарних щитів тільки по нижній межі монолітних балок і в швах з підвіскою її до збірних балок.

В ході розрахунку розглянута конструкція – система перехресних балок таврового перетину, що чинять опір вигину [7]. Крутний момент у таких системах на порядок менше, ніж згинальний [4]. Опір системи крутінню не враховується. Згідно з будівельними нормами визначена жорсткість балок на ділянках з тріщинами. На ділянках без тріщин жорсткість визначається за формулою, що враховує тривалу повзучість бетону:

$$B^* = E_b \cdot v(t) \cdot I_{red} \cdot v(t) = \frac{k}{1 + k\varphi}, \quad (1)$$

де  $I_{red}$  – момент інерції приведенного перерізу,  $E_b$  – модуль пружності бетону,  $k = 0,85$  коефіцієнт, який враховує вплив не пружних деформацій бетону при короткочасній дії навантаження,  $\varphi$  – характеристика повзучості бетону [8].

Розрахунок згинальних попередньо напружених елементів при утворенні нормальних тріщин:

$$M_r \leq M_{crc}, \quad (2)$$

де  $M_r$  – момент зовнішніх сил, розташованих по одну сторону від розглянутого перерізу щодо осі, паралельної нульовій лінії, і яка проходить через ядрову точку, найбільш віддалену від розтягнутої зони. Для елементів, до тріщиностійкості яких пред'являються вимоги першої категорії, площа перерізу напруженої арматури у всіх випадках визначається з умови забезпечення їх тріщиностійкості. Дане правило в більшості випадків відноситься також до елементів, для тріщиностійкості яких слід дотримуватися вимог другої категорії.

Можна записати, що опір нормального перетину утворення тріщин [8]

$$M_{crc} = R_{bt,ser} W_{pl} + P(e_{0p} + r), \quad (3)$$

де

$$W_{pl} = \gamma W_{red}. \quad (4)$$

Це момент опору приведенного перерізу елемента по розтягнутій від зовнішнього навантаження зоні з урахуванням не пружних деформацій розтягнутого бетону в припущенні відсутності поздовжньої сили  $N$  і зусилля попереднього обтиску  $P$ ;  $\gamma$  – коефіцієнт, що враховує вплив пластичних деформацій бетону розтягнутої зони;  $e_{0p}$  – відстань від нейтральної осі перетину до зусилля  $P$ . Вплив пластичних деформацій бетону стиснутої зони враховується шляхом зменшення ядерної відстані  $r$ .

Результати розрахунку з використанням програмного комплексу RUSZT-KESSON та ANSYS дослідної конструкції СМКП з квадратними кесонами 2×2 м перекриття торгового залу розмірами 12×18 м у Львові. Перекриття по контуру спирається на несучі стіни. Балки прольотом  $l = 12$  м – збірні переднапружені прямокутного перерізу 300×300 мм. Бетон класу В25. Арматура 2d28 мм зі сталі класу А – III в. Величина попереднього напруження  $\sigma_0 = 350$  МПа. Арматура монолітних балок великого прольоту  $L = 18$  м – 2d25 мм зі сталі класу А-IIIв. Бетон замонолічування класу В20. Повна висота перерізу кесона – 500 мм. Товщина плити кесона – 40 мм.

Натурні випробування конструкції перекриття проводилися рівномірним навантаженням в три етапи до рівня  $p = 3,5$  кН/м<sup>2</sup>. Витрата бетону на 1 м<sup>2</sup> перекриття – 0,15 м<sup>3</sup>. Максимальний прогин перекриття при повному навантаженні склав 29 мм, тобто 1/415 прольоту  $l$  [5]. Тріщини в ребрах великого ненапруженого прольоту не виявлені. В середньому ребрі менш напруженого прольоту були виявлені волосяні тріщини з розвитком на висоту до рівня робочої арматури.

Розрахункові дані прогинів і згинальних моментів перехресної системи при короткочасному (характеристика повзучості бетону  $\varphi = 0$ ) і тривалому ( $\varphi = 1,4$ ) навантаженні рівномірно-розподіленим навантаженням наведені в таблиці 1.

Під час утворення тріщин згинальні моменти становлять 186 кНм в напрямку меншого прольоту; 23,4 кНм – в напрямку більшого прольоту. За даними розрахунку тріщини в перекритті не виникали. Прогини розрахункові та експериментальні якісно співпадають. При тривалій дії навантаження прогини збільшуються приблизно в два рази. Перерозподіл зусиль при повзучості практично не спостерігається.

**Розрахункові дані прогинів і згинальних моментів перехресної системи**

Величина	RUSZT-KESSON		ANSYS	
	$\varphi = 0$	$\varphi = 1,4$	$\varphi = 0$	$\varphi = 1,4$
Повзучість бетону				
Прогини, мм	19,5	42	20	40
Згинальні моменти, кНм	136	142	130	143

**Висновки.** В результаті розрахунків з використанням програмних комплексів RUSZT-KESSON та ANSYS та у порівнянні з експериментальними даними підтверджена ефективність конструктивного рішення збірно-монолітних кесонних перекриттів з попередньо-напруженими ребрами короткого прольоту, що володіють підвищеною жорсткістю і тріщиностійкістю.

**Література**

1. Бубнов И.Г. Строительная механика корабля / Бубнов И.Г. – Петербург, 1914. – 141 с.
2. Папкович П.Ф. Строительная механика корабля / Папкович П.Ф. – М. – Л. : Морской транспорт, 1949. – 557 с.
3. Папкович П.Ф. Труды по строительной механике корабля / Папкович П.Ф. – Л. : Судпромгиз, 1962. – 573 с.
4. Яременко Н.А. О расчете балочных ростверков методом перемещений / Н.А. Яременко // Вестник ОНМУ. – Одесса, 2005. – Вып. 5 – С. 173–188.
5. Гнидец Б.Г. Предварительно напряженные сборно-монолитные кесонные перекрытия / Б.Г. Гнидец, П.П. Завадяк, П.П. Рутковский и др. // Передовой производственный опыт. – 1989. – Вып. 1. – С. 12–43.
6. Гнидец Б.Г. Збірно-монолітні статично невизначені залізобетонні конструкції з напруженими стиками і регулюванням зусиль / Б.Г. Гнидець // Вісник Львівського ДАУ. – Львів, 2000. – № 1. – С. 5–43.
7. Кваша В.Г. Расчет однопролетных и неразрезных строений железобетонных автодорожных мостов / В.Г. Кваша, А.Ф. Яременко, О.В. Філін // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – Київ, 2004. – Вип. 69 – С. 81–87.
8. Кудзис А.П. Железобетонные и каменные конструкции. Ч. I. Материалы, конструирование, теория и расчет / Кудзис А.П. – М. : Высшая школа, 1988. – 287 с.

**References**

1. Bubnov I.G. Structural mechanics of the ship. Petersburg, 1914. 141 p.
2. Papkovich P.F. Structural mechanics of the ship. M. L.: Morskoi transport, 1949. 557 p.
3. Papkovich P.F. Proceedings on the structural mechanics of the ship. L.: Sudpromgiz, 1962. 573 p.
4. Yaremenko N.A. On the calculation of beam grillages by the displacement method. Vestnik ONMU. Odessa, 2005. Issue. 5, p. 173–188.
5. Gnidets B.G., Zavadyak P.P., Rutkovsky P.P. et al. Pre-stressed precast-monolithic caisson floors. Advanced manufacturing experience. Sat 1989. Issue 1. p. 12–43.
6. Gnidets B.G. Zbirno-monolitni statically undetermined concreted constructions with loaded sticks and regulating. Vistnik of the Lviv DAU. Lviv, 2000. No. 1. p. 5–43.
7. Kvasha V.G., Yaremenko A.F., Filin O.V. Calculation of single-span and continuous structures of reinforced concrete road bridges. Automobile roads and roads. Kyiv, 2004. Vip. 69, p. 81–87.
8. Kudzis A.P. Reinforced concrete and stone structures. Part I. Materials, design, theory and calculation. M.: Vishaya shkola, 1988. 287 p.

Рецензія/Peer review : 01.11.2019 р.

Надрукована/Printed : 02.01.2020