

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ДЕРИЗЕМЛЯ СВІТЛАНА ВОЛОДИМИРІВНА**

УДК 624.044+624.048

ДИСЕРТАЦІЯ

**НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ  
ПРОГОНОВИХ БУДОВ З РАЦІОНАЛІЗАЦІЄЮ ЇХ ГЕОМЕТРИЧНИХ  
ПАРАМЕТРІВ**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди  
19 – архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



С.В. Дериземля

Науковий керівник: Ватуля Гліб Леонідович, доктор технічних наук,  
професор

Харків – 2021

## АНОТАЦІЯ

Дериземля С.В. Напружено-деформований стан сталезалізобетонних прогонових будов з раціоналізацією їх геометричних параметрів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди (19 – Архітектура та будівництво). – Український державний університет залізничного транспорту, Харків, 2021.

Дисертація присвячена дослідженню напружено-деформованого стану (НДС) сталезалізобетонних прогонових будов, що працюють на згин, при дії постійного і тимчасового навантаження. Актуальність теми дисертаційної роботи зумовлена тим, що існує достатня кількість недоопрацьованих питань з дослідження роботи і розрахунку сталезалізобетонних елементів, що працюють на згин, які потребують удосконалення, у тому числі методів розрахунку таких конструкцій, а також процедури їх оптимального проектування.

У **вступі** представлена загальна характеристика роботи, наведені актуальність, зв'язок з науковими темами, сформульовані цілі і задачі досліджень, описані практична значимість і наукова новизна.

У **першому розділі** виконано огляд наукової літератури щодо роботи сталезалізобетонних конструкцій, які широко застосовуються при будівництві і реконструкції будівель і споруд у всьому світі, проектування яких регламентується різними нормативними документами. Широке застосування цих конструкцій обумовлено економією матеріалів, зниженням трудомісткості виготовлення, скороченням термінів монтажу. Наведено основні типи комбінованих поперечних перерізів, які можуть застосовуватись як при будівництві, так і при реконструкції будівель та споруд різного призначення. Обґрунтовано доцільність використання таких конструкцій. Розглянуто існуючі методики розрахунку сталезалізобетонних елементів, що працюють на згин. Більш детальне дослідження НДС

комбінованих конструкцій можливе на базі нелінійних моделей, які можуть відображати роботу конструкції на всіх етапах навантаження і до моменту руйнування, що важливо враховувати при проектуванні та розрахунку будівель та споруд. Виконано огляд існуючих програмних комплексів для моделювання роботи сталезалізобетонних конструкцій методом скінченних елементів. Сучасні програмні комплекси дозволяють реалізовувати задачі, як в пружній, так і в нелінійній постановці, при цьому враховуючи всі види навантажень, в тому числі і температурний нагрів.

Поряд з широким досвідом проектування сталобетонних конструкцій залишається ряд недостатньо опрацьованих питань, у тому числі, раціоналізація геометричних параметрів поперечних перерізів, а також питань щодо удосконалення їх методів розрахунку. Виходячи з усього вищезазначеного було сформульовано основні задачі дослідження.

У **другому розділі** представлені теоретичні дослідження комбінованих поперечних перерізів і конструктивних систем балочних сталезалізобетонних прогонових будов мостів. Розроблено алгоритм раціоналізації поперечних перерізів шляхом варіювання їх геометричних параметрів, застосовуючи метод приведенного перерізу та враховуючи вибраний критерій оптимальності. Проведено порівняння запропонованого рівномірного комбінованого перерізу з існуючими аналогічними перерізами, у тому числі порівняння їх показників вартості. Наведена загальна постановка задачі оптимального проектування та схема послідовності реалізації запропонованої процедури оптимізації. На прикладі трипрогової нерозрізної балки на пружно-податливих опорах реалізовано запропонований алгоритм оптимізації для пошуку оптимальних рішень багатопрогових статично визначених і статично невизначених балочних систем. У результаті застосування алгоритму, отримано оптимальні конструктивні рішення для: багатопрогової балки з шарнірами на крайніх прогонах; багатопрогової балки з шарнірами у середньому прогоні; балки з односторонніми опорними зв'язками; балки зі зміщеними опорами; балки з пружно-податливими

зв'язками. Результати оптимізації всіх балок, враховуючи дію постійних і тимчасових навантажень, наведені у табличній формі. Показано, що оптимальні рішення існують як у множині статично визначених, так і у множині статично невизначених систем.

У **третьому розділі** описані основні принципи моделювання будівельних конструкцій, із застосуванням програмних комплексів, які реалізують метод скінченних елементів. Об'єктом дослідження було вибрано нерозрізну сталезалізобетонну прогонову будову мосту. У результаті дослідження виконано скінченно-елементне моделювання роботи трипрогонового мосту, застосовуючи ПК ЛІРА-САПР 2018 Pro (Ліцензія №1/6638), з метою перевірки і уточнення результатів, які отримано шляхом реалізації запропонованого алгоритму оптимізації, з урахуванням багатостадійної роботи прогонової будови (конструктивна нелінійність), фізичної нелінійності і повзучості бетону, перерозподілу зусиль в силу податливості гнучкого з'єднання по контакту між бетоном і сталлю. Фізична нелінійність була врахована за експоненціальною діаграмою деформування бетону і матеріалу, що армується (21-й і 11-й закон деформування). Врахування повзучості бетону виконано у відповідності до Єврокод 2. Розрахунок передбачає побудову пластинчато-стержневої розрахункової схеми з застосуванням універсальних стержневих скінченних елементів (СЕ) для моделювання балочної решітки і фізико-нелінійних СЕ оболонки для моделювання плити проїзної частини. Модель будується у межах всієї прогонової будови. Забезпечення сумісної роботи елементів перерізу виконано за допомогою абсолютно жорстких тіл, а також двохвузлових СЕ пружного зв'язку із заданою жорсткістю для моделювання роботи гнучких упорів.

Розрахунок було виконано з урахуванням етапності навантаження під час монтажу та дії рухомого навантаження НК-100 і А-15. Результати розрахунку наведені для випадку найбільш невідного завантаження.

Ефективність сталезалізобетонних конструкцій з часом не знижується і буде залежати від раціонального складу бетону, при якому мінімізуються деформації повзучості; і оптимальних співвідношень конструктивних параметрів споруди.

Як показують розрахунки, врахування послідовності завантаження моделі прогонової будови і податливості по контакту бетону і сталі призводять до зменшення впливу плити проїзної частини на несучу здатність споруди. Також встановлено, що пластичні властивості матеріалів і довготривалі процеси, які відбуваються в об'єднаному перерізі, впливають на НДС, збільшуючи згинальний момент і деформації у сталевих балках.

Удосконалена методика моделювання дозволила виконати аналіз і оцінку НДС, а також встановити несучу здатність прогонової будови мосту та визначити раціональну конструкцію комбінованого перерізу для відповідності навантаженням НК-100 і А-15.

У результаті вирішення пошукової задачі підібрано два типорозміри поперечних перерізів, а також у табличній формі наведено порівняння комбінованих перерізів, отриманих сполученням процедури оптимізації і комп'ютерного моделювання. Уточнення розмірів, отриманих за допомогою ПК ЛІРА САПР дозволило знизити витрати металу на 6-11%.

У **четвертому розділі** виконано впровадження результатів дисертаційної роботи в практику будівництва і реконструкції транспортних споруд, застосовуючи запропонований алгоритм оптимального проектування, а також удосконалений розрахунок скінченно-елементної моделі прогонової будови сталезалізобетонного мосту, отриманий за допомогою ПК ЛІРА-САПР 2018 Pro (Ліцензія №1/6638). Запропоновані рішення були реалізовані в проектних рішеннях в межах госпдоговірних науково-дослідних робіт з розробки проектно-кошторисної документації на капітальний ремонт мостів: через р. Вереп автомобільної дороги державного значення Р-69 Київ – Чернігів у Чернігівській області (№ ДР 0121U112723); на автомобільній дорозі загального користування О221801 Чаплинка –

Новотроїцьке – Рикове на ділянці 0+000 – км 20+000 у Херсонській області (№ ДР 0121U112720).

Запропонований алгоритм оптимального проектування і пошуку раціонального комбінованого перерізу було застосовано при проектуванні і реконструкції об'єктів споруд транспортного призначення у філії «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту» АТ «Укрзалізниця».

Результати досліджень знайшли практичне застосування у навчальному процесі при підготовці магістрів-науковців і докторів філософії за освітніми програмами «Залізничні споруди і колійне господарство» і «Будівництво та цивільна інженерія» в Українському державному університеті залізничного транспорту.

**Ключові слова:** сталезалізобетонна балка, сталезалізобетонна прогонова будова, розрахунок сталезалізобетонної балки, напружено-деформований стан, раціоналізація перерізу, скінченно-елементне моделювання.

## ABSTRACT

Deryzemlia S.V. The Stress-strain State of Steel-concrete Spans Using Rationalization of their Geometrical Parameters. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation for the degree of the candidate of technical sciences (doctor of philosophy) on the speciality 05.23.01 – building constructions, buildings and structures (19 – Architecture and Construction). – Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, 2021.

The dissertation is devoted to the research of the stress-strain behaviour of steel-concrete spans work on bending under dead and temporary load. The relevance of the topic of the dissertation work is due to the fact that there are a sufficient number of immature questions on the study of the work and calculation of steel-concrete elements working on the bend, which require improvement,

including methods for calculating such structures, as well as procedures for their optimal design.

The **Introduction** presents the general characteristics of the work, provides relevance, connection with scientific topics, research goals and objectives are formulated, the practical significance and scientific novelty are described.

**The First Chapter** reviews the scientific literature of steel-concrete structures work, which are widely used in the construction and reconstruction of buildings and structures around the world, the design of which is regulated by various regulatory documents. The widespread structures using is due to saving materials, reducing the manufacturing labor intensity, and reducing erection time. The main types of composite cross-sections that can be used both in the construction and reconstruction of buildings and structures for various purposes are given. The expediency of using such structures is justified. Existing methods for calculating steel-reinforced concrete elements working on bending are considered. Existing calculation methods of steel-concrete elements working on bending are considered. A more detailed study of stress-strain behaviour of composite structures is possible on the basis of nonlinear models that can reflect the operation of the structure at all stages of loading and up to the moment of destruction, which is important to take into account during designing and calculation of buildings and structures. The overview of existing software packages which based of finite element method to modelling of steel-concrete structures work is performed. Modern software packages allow to implement tasks in both elastic and nonlinear formulation, while taking into account all types of loads, including temperature heating.

Along with extensive experience in designing steel-concrete structures, a number of insufficiently developed issues remain, including rationalization of geometric parameters of cross-sections, as well as issues related to improving their calculation methods. Based on all of the above, the main objectives of the study were formulated.

The **Second Chapter** presents theoretical studies of composite cross-sections and structural systems of steel-concrete beam spans of bridges. An algorithm for cross-sections rationalization is developed by varying their geometric parameters, using the reduced cross-section method and taking into account the selected optimality criterion. The proposed equal composite cross-section is compared with existing similar cross-sections, including their cost indicators comparison. The general statement of the optimal design problem and the scheme of the sequence of implementation of the proposed optimization procedure are given. Using the example of a three-span continuous beam on elastically malleable supports, the proposed optimization algorithm is implemented to find optimal solutions for multi-span statically defined and statically indeterminate beam systems. As a result of applying the algorithm, optimal design solutions are obtained for: a multi-span beam with hinges on the extreme purlins; a multi-span beam with hinges in the middle span; beams with one-sided support joints; beams with displacement supports; beams with elastic-pliable connections. The results of optimization of all beams, taking into account the effect of constant and temporary loads, are shown in Tabular Form. It is shown that optimal solutions exist in both a set of statically determinated and a set of statically indeterminate systems.

The **Third Chapter** describes the basic principles of modelling building structures using software packages that implement the finite element method. The object of the study is a continuous steel-concrete span structure of the bridge. As a result of the study, finite element modelling of the three-span bridge work was performed, using Lira-CAD 2018 Pro (License No. 1/6638), in order to check and clarify the results obtained by implementing the proposed optimization algorithm, taking into account the multi-stage work of the superstructure (structural nonlinearity), physical nonlinearity and concrete creep, the redistribution of forces due to the pliability of the flexible joint on contact between concrete and steel. Physical nonlinearity was taken into account using the exponential deformation diagram of concrete and reinforced material (the 21st and 11th deformation laws). Concrete creep accounting is performed in accordance with Eurocode 2. The



calculation involves the construction of a plate-rod design scheme using universal rod finite elements (FE) for modelling a beam grid and physical-nonlinear FE shells for modelling a roadway plate. The model is built within the entire span structure. Ensuring the joint work of cross-section elements is performed using absolutely rigid bodies, as well as two-node elastic coupling elements with a given stiffness for modelling the work of flexible studs.

The calculation was performed taking into account the stage load during installation and the action of the NK-100 and a-15 mobile load. The calculation results are given for the case of the most unprofitable load.

The efficiency of steel-concrete structures does not decrease over time and will depend on the rational concrete composition, which minimizes creep deformations; and optimal ratios of structural parameters of the structure.

Calculations show that taking into account the loading sequence of the superstructure model and the compliance with the contact of concrete and steel lead to a decrease of the roadway plate influence on the load-bearing capacity of the structure. It was also found that the ductile of materials properties and long-term processes that occur in the composite cross-section affect the stress-strain behavior, increasing the bending moment and deformations in steel beams.

The improved modelling technique allowed to analyze and evaluate the stress-strain behaviour, as well as establish the load-bearing capacity of the bridge span and determine the rational design of the composite cross-section to meet the loads of the NK-100 and A-15.

As a result of the search problem solving, two standard sizes of cross-sections are selected, and a comparison of the composite cross-sections obtained by combining the optimization procedure and computer modelling is presented in tabular form. The dimensions refinement obtained using the Lira CAD made it possible to reduce metal consumption by 6-11%.

In the **Fourth Chapter**, the results of the dissertation work were introduced into the practice of construction and reconstruction of transport structures, applying the proposed optimal design algorithm, as well as an improved calculation of the

finite element model of the superstructure of a steel-concrete bridge obtained using the Lira-CAD 2018 Pro (license No. 1/6638). The proposed solutions were implemented in design solutions within the framework of contractual research works on the development of design and estimate documentation for major repairs of bridges: across the Verep river of the highway of state significance R-69 Kiev-Chernihiv in the Chernihiv region (No. SR 0121U112723 ); on the public road O221801 Chaplynka-Novotroitske-Rykove on the section 0+000-km 20+000 in the Kherson region (No. SR 0121U112720).

The proposed algorithm for optimal design and search for a rational composite cross-section was applied in the design and reconstruction of transport facilities in the branch "Design and Survey Institute of Railway Transport", JSC "Ukrzaliznytsia".

The results of the research have found practical application in the educational process in the training of masters-scientists and doctors of philosophy in the educational programs "Railway Structures and Track Management" and "Building and Civil Engineering" at the Ukrainian State University of railway transport.

**Keywords:** steel-concrete beam, steel-concrete span, calculation of the steel-concrete beam, stress-strain state, rationalization of cross-section, finite element modelling.

## ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України та збірниках наукових праць, що включені до міжнародних наукометричних баз:

1. Китов Ю.П., Ватуля Г.Л., Веревичева М.А., Дериземля С.В. Рационализация сечений сталежелезобетонных балок. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2016. Вып. 10. С. 27-34.  
*Особистий внесок здобувача: запропоновано алгоритм раціоналізації комбінованого поперечного перерізу, виконано порівняння запропонованого раціонального перерізу з існуючим тієї ж несучої здатності.*
2. Kitov Yu.P., Verevicheva M.A., Vatulia G.L., Deryzemlia S.V. Design solutions of optimal systems under action of dead and live mobile load. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2018. Vol. 100. P. 124-139.  
*Особистий внесок здобувача: виконано розрахунок оптимальних рішень, отриманих за допомогою запропонованого алгоритму оптимізації, на дію постійних і тимчасових навантажень.*
3. Дериземля С.В. Обґрунтування та вибір раціональних конструктивних перерізів, можливості їх застосування у різних напрямках будівництва. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. Харків: УкрДУЗТ, 2021. Вып. 195. С. 20-25.  
*Особистий внесок здобувача: виконано огляд існуючих загальних характеристик і конструктивних особливостей найбільш поширених сталезалізобетонних поперечних перерізів.*

Публікації у міжнародних періодичних виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз:

4. Kitov Yu., Verevicheva M., Vatulia G., Orel Ye., Deryzemlia S. Design solutions for structures with optimal internal stress distribution. *MATEC Web of Conferences*, 2017, Vol. 133. 03001.

*Особистий внесок здобувача: отримано оптимальні рішення конструктивних систем балочних мостів у множині статично визначених і статично невизначених систем.*

5. Vatulia G L, Lobiak O V, Deryzemlia S V, Verevicheva M A, Orel Ye F Rationalization of cross-sections of the composite reinforced concrete span structure of bridges with a monolithic reinforced concrete roadway slab. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2019, Vol. 664 (1). 012014.

*Особистий внесок здобувача: виконано скінченно-елементне моделювання з метою перевірки і уточнення запропонованого алгоритму оптимізації.*

Публікації апробаційного характеру:

6. Дериземля С.В. Численное моделирование сталебетонной балки при температурно-силовом воздействии. *Образование, наука, производство: сб. тр. конф. VII Международный молодежный форум*. Белгород: БелГТУ им. Шухова, 2015. С. 2469-2474.
7. Дериземля С.В. Вибір раціональних моделей розрахунку напружено-деформованого стану сталебетонних конструкцій. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*, 2016. Вип. 160, ч. 2. С. 76-77.
8. Дериземля С.В. Моделирование работы сталебетонных конструкций под воздействием силовых и температурных нагрузок. *Актуальные проблемы инженерной механики: тезисы докладов III Международной научно-практической конференции*. Одесса: ОГАСА, 2016. С. 62-65.
9. Дериземля С.В. Можливість моделювання сталебетонних конструкцій в різних програмних комплексах. *Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація: зб. наук. статей*. Полтава: ПолтНТУ, 2016. Вип. 12. С. 108-109.
10. Дериземля С.В., Комагорова С.Д. Про методи оптимального проектування комбінованих систем. *Проблеми сучасного будівництва: зб.*

наук. праць за матеріалами III всеукраїнської інтернет-конференції молодих учених і студентів. Полтава: ПолтНТУ, 2016. С. 163-165.

*Особистий внесок здобувача: виконано аналіз існуючих методів оптимального проектування комбінованих систем.*

11. Дериземля С.В. Вибір оптимальної конструкції трипрогонового балкового моста при дії постійного і тимчасового навантаження. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. Харків: УкрДУЗТ, 2018. Вип. 177. С. 99.
12. Кітов Ю.П., Вєрєвічева М.А., Дериземля С.В., Ватуля Г.Л., Орел Є.Ф. Розрахунок конструкції трипрогонового балочного моста під дією постійного і тимчасового навантаження. *ТРАНСБУД 2018*. Харків: УкрДУЗТ, 2018. С. 114-115.  
*Особистий внесок здобувача: розраховано трипрогонову балочну систему під дією рухомого навантаження.*
13. Дериземля С.В., Ватуля Г.Л., Орел Е.Ф., Опанасенко Е.В. Оптимизация конструкции балочных систем при постоянной и временной нагрузке. *III Міжнародна конференція «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд»* Одеса: ОДАБА, 2019. С. 57.  
*Особистий внесок здобувача: застосовано алгоритм оптимального проектування для трипрогонової балки.*
14. Ватуля Г.Л., Лобяк А.В., Дериземля С.В., Вєрєвічева М.А., Орел Е.Ф. Выбор оптимального сечения сталежелезобетонных пролетных строений мостов с монолитной железобетонной плитой. *Трансбуд-2019*. Харків: УкрДУЗТ, 2019. С. 44-45.  
*Особистий внесок здобувача: застосовано алгоритм раціоналізації комбінованого перерізу для реальної конструкції.*
15. Дериземля С.В., Ватуля Г.Л., Опанасенко Е.В. Конструктивные решения систем с оптимальным распределением внутренних усилий. *МНТК «Сучасні технології будівництва та експлуатації автомобільних доріг»* Харків: ХНАДУ, 2020.

*Особистий внесок здобувача: запропоновано можливі варіанти оптимальних конструкцій трипрогонового мосту.*

Додаткові публікації:

16. Вєревичєвє М.А., Бєрєст'єнскєє А.А., Дєрїзємл'є С.В. В'єбєр рєцїєнєл'єн'єх пєрємєтрєв фїбрєвєгє армїрєвєн'єє. *Стрєїтєл'єствє, мєтєрїєлєвєдєнїє, мєшїнєстрєєнїє*. 2015. В'єп. 82. С. 60-69.

*Особистий внесок здобувача: об'єрунтувєн'єє вїбєру вїдсотку тє тїпу фїбрєвєгє армувєн'єє.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК.....	23
1.1 Існуючі методи розрахунку несучої здатності і оцінки напружено-деформованого стану сталезалізобетонних балок .....	23
1.2 Підходи до раціоналізації поперечних перерізів сталезалізобетонних балок .....	33
1.3 Застосування сучасних програмних комплексів для моделювання роботи сталезалізобетонних конструкцій методом скінченних елементів...	37
1.4 Висновки за розділом та задачі досліджень .....	41
РОЗДІЛ 2. РАЦІОНАЛІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ КОНСТРУКТИВНОГО РІШЕННЯ ПРОГОНОВОЇ БУДОВИ МОСТУ.....	43
2.1. Принципи проектування та критерії оптимальності.....	43
2.2. Загальна постановка задачі оптимального проектування.....	47
2.2.1. Лінійна цільова функція і лінійні обмеження.....	50
2.3. Загальна послідовність реалізації запропонованої процедури оптимізації .....	51
2.4. Раціоналізація геометричних параметрів запропонованого перерізу ....	52
2.5. Алгоритм оптимального проектування .....	61
2.6. Застосування алгоритму оптимального проектування з урахуванням дії постійного і тимчасового навантаження .....	66
2.6.1. Оптимізація конструкції трипрогонового балочного мосту.....	69
2.6.2. Оптимізація багатопрогової статично визначеної балки з шарнірами у крайніх прогонах.....	70
2.6.3. Багатопрогонова балка з шарнірами у середньому прогоні .....	71
2.6.4. Оптимізація нерозрізної балки.....	73

2.6.5. Нерозрізна балка з односторонніми опорними зв'язками .....	75
2.6.6. Нерозрізна балка зі зміщеними опорами.....	77
2.6.7. Нерозрізна балка на пружно-податливих опорах.....	80
2. 7. Висновки за розділом .....	86
<b>РОЗДІЛ 3. ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЇ.....</b>	<b>87</b>
3.1. Принципи моделювання і постановка задачі .....	87
3.2. Об'єкт дослідження .....	91
3.3. Реалізація запропонованого алгоритму оптимального проектування....	93
3.3.1. Визначення навантажень і впливів .....	100
3.4 Аналіз результатів розрахунку.....	101
3.4.1. Поздовжні балки .....	102
3.4.2. Консолі і поперечні балки .....	104
3.4.3. Діафрагми .....	105
3.4.4. Деформації. Будівельний підйом .....	106
3.4.5. Визначення кількості упорів .....	107
3.4.6. Плита проїзної частини .....	108
3.5 Висновки за розділом .....	110
<b>РОЗДІЛ 4. ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ .....</b>	<b>111</b>
4.1 Застосування оптимізаційної процедури при проектуванні трипрогонового мосту.....	111
4.2 Застосування оптимізаційної процедури при реконструкції існуючого трипрогонового мосту .....	114
4.3 Застосування оптимізаційної процедури при реконструкції залізничного мосту .....	117
4.4 Висновки за розділом .....	118



ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	120
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	122
ДОДАТОК А. ПОБУДОВА ЛІНІЙ ВПЛИВУ $X_1$ , $X_2$ .....	139
ДОДАТОК Б. НАВАНТАЖЕННЯ, ЩО ВРАХОВУВАЛИСЬ ПРИ РОЗРАХУНКУ ПРОГОНОВОЇ БУДОВИ МОСТУ. ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРІАЛІВ .....	142
ДОДАТОК В. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ КОНСТРУКЦІЇ МОСТУ .....	147
ДОДАТОК Д. РОЗРАХУНОК ПРОГОНОВОЇ БУДОВИ ЗАЛІЗНИЧНОГО МОСТУ .....	158
ДОДАТОК Е. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ.....	177
ДОДАТОК Ж. ПЕРЕЛІК НАУКОВИХ ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА. ВІДОМІСТЬ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	182

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Розвиток будівництва обумовлює використання сучасних технологій та конструктивних рішень як при спорудженні нових, так і реконструкції існуючих будівель і споруд. Пошук раціональних сполучень конструкцій тісно пов'язаний з питаннями ефективного використання будівельних матеріалів з точки зору раціонального використання їх міцнісних властивостей, а також оптимізації геометричних параметрів конструкцій при забезпеченні їх несучої здатності.

Застосування в практиці сучасного будівництва комбінованих конструкцій, елементи яких виконані із сталебетону та сталезалізобетону, призводить до суттєвої економії будівельних матеріалів, зниження енергозатрат та скорочує терміни будівництва.

З пошуком нових конструкцій, що відповідали б вимогам будівництва та експлуатації тих чи інших споруд, на сьогоднішній день значну увагу приділяють сталезалізобетонним елементам. Упродовж розвитку та вдосконалення сталезалізобетонні конструкції набули значних змін з точки зору забезпечення сумісної роботи бетону та сталі. Такі конструкції потребують постійного дослідження та удосконалення з метою зниження власної ваги, фінансових затрат на виготовлення тощо. Рішення такої задачі може бути представлено у формі задачі оптимізації конструкцій, в якому оптимальний проект відповідає заданому критерію при виконанні умов, що забезпечують надійну роботу конструкції.

Поряд з удосконаленням інженерних методів розрахунку, у тому числі з уведенням їх у національні норми проектування, актуальним завданням є розробка та експериментально-теоретичне обґрунтування комп'ютерних моделей для розрахунку сталезалізобетонних конструкцій з використанням сучасних програмних комплексів, які реалізують метод скінченних елементів.

Таким чином, дисертаційна робота спрямована на раціоналізацію конструктивного рішення сталезалізобетонного перерізу прогонових будов

мостів, а також на розробку їх скінченно-елементних моделей з метою перевірки і уточнення отриманих результатів, а також опису їх напружено-деформованого стану (НДС) з урахуванням роботи конструкції на стадіях її зведення, є актуальною та має теоретичне і практичне значення.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана в рамках тематики кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту за 2015 - 2020 рр.: «Теоретичні та експериментальні основи визначення, прогнозування та забезпечення несучої здатності та довговічності транспортних споруд в умовах агресивних впливів» (№ ДР 0119U100295), а також у рамках науково-дослідних робіт щодо відновлення технічного стану мостів Харківської, Херсонської і Чернігівської областей (№ ДР 0121U112720, 0121U112723, 0121U112722).

**Мета дослідження** – раціоналізація перерізів та методів розрахунку сталезалізобетонних прогонових будов мостів шляхом варіювання їх геометричних параметрів.

**Об'єкт дослідження** – сталезалізобетонна прогонова будова мосту із залізобетонним верхнім поясом, що працює на згин.

**Предмет дослідження** – несуча здатність та НДС сталезалізобетонної прогонової будови мосту з урахуванням раціоналізації їх геометричних параметрів.

**Задачі дослідження:**

- розробити методику пошуку раціонального перерізу сталезалізобетонної прогонової будови мосту за критерієм рівномірності;
- розробити алгоритм оптимального проектування конструктивної системи сталезалізобетонного мосту;
- виконати скінченно-елементне моделювання конструкції прогонової будови сталезалізобетонного мосту з урахуванням отриманого раціонального перерізу для опису його НДС;

- дослідити НДС конструкції прогонової будови мосту під дією постійного і тимчасового навантаження з урахуванням нелінійних властивостей матеріалів, повзучості та генетичної нелінійності конструкції.

**Методи дослідження** – методи будівельної механіки, теорії пружності та пластичності, механіки твердого деформованого тіла при теоретичних дослідженнях НДС сталезалізобетонних балок; метод скінченних елементів для чисельної реалізації розрахунку конструкції прогонової будови; методи математичної статистики для аналізу та порівняння результатів дослідження.

**Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:**

- запропоновано раціональний переріз сталезалізобетонної двотаврової балки з властивостями рівномірності;

- запропоновано алгоритм оптимального проектування конструкції на прикладі трипрогонової будови мосту;

- удосконалено скінченно-елементну модель прогонової будови сталезалізобетонного мосту з урахуванням запропонованого раціонального поперечного перерізу;

- удосконалено методику оцінки НДС конструкцій прогонової будови сталезалізобетонного мосту з урахуванням процедури оптимізації та з урахуванням нелінійних властивостей матеріалів, повзучості та генетичної нелінійності конструкції.

**Достовірність положень і висновків дисертації** забезпечена співставленням отриманих даних при теоретичному розрахунку та скінченно-елементному моделюванні, а також їх порівнянням з результатами інших дослідників, у тому числі експериментальними, що відображені у відкритих публікаціях. Чисельний розрахунок виконувався за допомогою програмного комплексу ЛПРА-САПР 2018 Pro (Ліцензія №1/6638). При розробці алгоритму пошуку раціонального перерізу та алгоритму оптимального проектування застосовувалися загальноприйняті теорії і припущення опору матеріалів та будівельної механіки, нелінійної деформаційної теорії залізобетону, методу скінченних елементів.

**Практичне значення отриманих результатів.** За результатами досліджень удосконалено конструкцію прогонової будови сталезалізобетонного мосту. Отримано поперечний переріз з властивостями рівномірності, а також надані пропозиції щодо розрахунку сталезалізобетонної прогонової будови, що складається з двотаврових балок із залізобетонним верхнім поясом. Запропоновано алгоритм оптимального проектування багатогогонових балочних конструктивних систем мосту під дією тимчасового навантаження. Розроблено скінченно-елементну модель трипрогонового сталезалізобетонного мосту для розрахунку несучої здатності з урахуванням нелінійних властивостей матеріалів, повзучості, багатостадійної роботи конструкції і податливості контакту бетону і сталі.

**Особистий внесок здобувача.** Здійснено огляд та аналіз літератури за тематикою дослідження; запропоновано двотавровий переріз з властивостями рівномірності та методику розрахунку сталезалізобетонних прогонових будов; застосовано методику оптимального проектування на прикладі трипрогонового сталезалізобетонного мосту; розроблено та удосконалено скінченно-елементну модель в ПК ЛІРА-САПР 2018 Pro (Ліцензія №1/6638). Участь автора у спільних публікаціях відображена в переліку опублікованих робіт.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на: науково-технічних конференціях Українського державного університету залізничного транспорту (м. Харків, 2016 р., 2018 р.); міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» - Трансбуд (м. Харків, УкрДУЗТ, 2018 р., 2019 р.); міжнародних науково-практичних конференціях Одеської державної академії будівництва та архітектури «Актуальные проблемы инженерной механики» (м. Одеса, 2016 р.) та «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд» (м. Одеса, 2019 р.); XII науково-технічній конференції «Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація» та III-й

всеукраїнській інтернет-конференції молодих учених і студентів «Проблеми сучасного будівництва» Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка (м. Полтава, 2016 р.); 9-й та 11-й міжнародних наукових конференціях «Aeronautics, Automotive and Railway Engineering and Technologies» BULTRANS (м. Созополь, Болгарія, 2017 р., 2019 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні технології будівництва та експлуатації автомобільних доріг» (м. Харків, 2020 р.).

**Публікації.** За результатами дисертаційної роботи опубліковано 16 наукових праць, з них 3 статті у фахових виданнях, рекомендованих МОН України, в тому числі 1 – у виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази WoS; 2 публікації у міжнародних періодичних виданнях, що індексуються НМБД Scopus, 10 публікацій апробаційного характеру та 1 додаткова публікація.

**Структура дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Дисертація викладена на 186 сторінках і містить 115 сторінок основного тексту, 14 таблиць, 34 рисунків, 164 найменувань літератури, 6 додатків на 48 сторінках.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Виноградов А.И. Проблема оптимального проектирования в строительной механике. Харьков: «Вища школа», 1973. 168 с.
2. Kitov Yu., Verevicheva M., Vatulia G., Orel Ye, Deryzemlia S. Design solutions for structures with optimal internal stress distribution. MATEC Web of Conferences: Proceedings of the International Scientific Conference on Aeronautics, Automotive and Railway Engineering and Technologies, Bultrans 2017, Sozopol, Bulgaria, 2017. Vol., No. 133. P. 03001.
3. Китов Ю.П., Ватуля Г.Л., Веревичева М.А. Некоторые соображения о критериях оптимальности. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ*. Харків: УкрДАЗТ, 2014. Вип. 143. С. 124–131.
4. Китов Ю.П., Ватуля Г.Л. Влияние параметров проектирования на оптимальность конструкции стальных балок. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ*. Харків: УкрДАЗТ, 2011. Вип. 125. С. 24-33.
5. Шмуклер В.С. Новые энергетические принципы рационализации конструкции. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. Харків: УкрДУЗТ, 2017. Вип. 167. С. 54-69.
6. Гоголь М.В., Більський М.Р., Пелешко І.Д. Проектування і розрахунок комбінованих мостових переходів. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика: зб. наук. праць ДНУЗТ*. Дніпропетровськ, 2012. Вип. 3. С. 33-38.
7. Основы расчета и проектирования комбинированных и сталебетонных конструкций / Чихладзе Э.Д., Ватуля Г.Л., Китов Ю.П. и др.; под ред. Э.Д. Чихладзе. Киев: Транспорт Украины, 2006. 136 с.
8. Стрелецкий Н.Н. Сталежелезобетонные мосты. Москва: Транспорт, 1965. 375 с.
9. Металеві конструкції / Ф. Є. Клименко, В. М. Барабаш, Л. І. Стороженко; за ред. Ф. Є. Клименко. 2-ге вид., випр. і доп. Львів: Світ, 2002. 312 с.
10. Веселов В. В. Эффективность применения сталебетонных балочных конструкций. *Строительные материалы, конструкции и сооружения XXI века: материалы I Международной научно-практической конференции*. СПб: ПГУПС. 2016. С. 48.

11. Salmon, Ch. G. Handbook of composite construction Engineering. Ch.2: Composite steel-concrete construction. New York, 1982. P. 41–79.
12. С. Тимошенко, Дж. Гере Механика материалов. 2-ое изд. СПб: Издательство «Лань», 2002. 672 с.
13. Стороженко Л. И., Семко А.В., Ефименко В. И. Сталежелезобетонные конструкции. Київ: Четверта хвиля, 1997. 160 с.
14. Krishan, A. L.; Nazarenko, D. I. Experimental research of the strength and stiffness of the beam made of steel and concrete. *In: Actual problems of architecture, construction and design: materials of the International student scientific conference of the Institute of construction, architecture and art.* Magnitogorsk: MSTU, 2014, P. 208–210.
15. Проблеми розробки національного нормативного документа «Сталезалізобетонні конструкції» / Ю. Г. Аметов, А. Н. Бамбура, О.В. Семко [та ін.] *Будівельні конструкції: Зб. наук. праць, Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій Міністерства регіонального розвитку та будівництва України.* Київ: НДІБК, 2008. Вип. 70. С. 10–14.
16. Бамбура, А. М., Аметов Ю. Г. До оцінки здатності сталобетонних елементів, що згинаються, на основі деформаційного методу і реальних діаграм деформації матеріалів. *Сталезалізобетонні конструкції.* Кривий Ріг: КТУ, 2004. Вип. 6. С. 71–76.
17. Дарков А.В., Шапиро Г.С. Сопротивление материалов. Москва: Высшая школа, 1975. 654 с.
18. Бондаренко В. М. и др. Железобетонные и каменные конструкции. М. : Высш. шк., 2011. 876 с.
19. Гибшман Е.Е. Проектирование стальных конструкций, объединенных с железобетоном, в автодорожных мостах. Москва: Автотрансиздат, 1956. 231 с.
20. Гольшев А.Б. Расчет предварительно напряженных железобетонных конструкций с учетом длительных процессов. Москва: Стройиздат, 1964. 151 с.



21. Замалиев Ф.С. Расчетно-экспериментальные исследования сталежелезобетонных балок. *Строительные конструкции, здания и сооружения*. Казань: Известия КГАСУ, 2017, № 4 (42).
22. Стороженко Л.І., Семко О.В., Пенц В.Ф. Сталезалізобетонні конструкції: навчальний посібник. Полтава, 2005. 181 с.
23. Клименко, Ф.Е. Сталебетонные конструкции с внешним полосовым армированием. Київ: Будівельник, 1984. 88 с.
24. Ватуля Г.Л. Расчет и проектирование комбинированных и сталебетонных конструкций: дисс. ... д-ра. техн. наук: 05.23.01 / Укр. гос. ун-т железнодорож. трансп. Харьков, 2015. 430 с.
25. Стороженко, Л.І., Лапенко О.І., Горб О.Г. Експериментальні дослідження балок двотаврового перерізу з верхніми залізобетонними полицями. *Зб. наук. праць «Галузеве машинобудування, будівництво»*. Полтава: ПНТУ, 2009. Вип. 24. С. 85 - 90.
26. Стороженко, Л.І., Крупченко О.А. Сталезалізобетонні балки із залізобетонним верхнім поясом. *Теорія і практика будівництва: Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*, № 662. 2010. С.354-360.
27. Jianguo Nie, Yan Xiao, Lin Chen Experimental Studies on Shear Strength of Steel-Concrete Composite Beams. *Journal of Structural Engineering*, 2004. Vol 130. № 8. P. 1206–1214.
28. Лапенко, О. І. Залізобетонні конструкції з робочим армуванням незнімною опалубкою : монографія. Полтава: ТОВ «АСМІ», 2009. 328 с.
29. Китов, Ю.П., Веревичева М.А., Кравцов Л.Б. О целесообразности усиления двутавровых балок путем заполнения межполочных пустот бетоном. *Будівельні конструкції: Міжнародний науково-технічний збірник «Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону»*. 2011. Вип. 74. С. 318–325.
30. Vasdravellis George, Brian Uy. Shear Strength and Moment-Shear Interaction in Steel-Concrete Composite Beams *Journal of Structural Engineering*, 2014. Vol. 140. № 11. P. 04014084-1-11.
31. Тимошенко С.П., Дж. Гере. Механика материалов. Москва: Мир, 1976. 564 с.

32. ДСТУ 8768:2018. Двотаври сталеві горячекатані. Сортамент. [Чинний від 2019-01-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ» України, 2018. 5 с.
33. Стороженко Л.І., Тимошенко В.М., Нижник О.В., Гасій Г.М., Мурза С.О. Дослідження і проектування сталезалізобетонних конструкцій. Полтава: АСМІ, 2008. 262 с.
34. Лихтарников Я.М. Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций. Москва: Стройиздат, 1979. 319 с.
35. Хог Э., Арора Я. Прикладное оптимальное проектирование (пер. с англ.). Механические системы и конструкции. Москва: Мир, 1983. 478 с.
36. М.И. Рейтман, Л.И. Ярин Оптимизация параметров железобетонных конструкций на ЭЦВМ. Москва: Стройиздат, 1974. 96 с.
37. Юрьев А.Г., Ключев С.В. Эволюционные и генетические алгоритмы оптимизации строительных конструкций. Белгород: Изд-во БГТУ, 2006. 134 с.
38. Юрьев А.Г. Основы проектирования рациональных несущих конструкций. Белгород: БТИСМ, 1988. 94 с.
39. Шмуклер В.С. Оптимизация параметров строительных конструкций в условиях регулирования их напряженно-деформированным состоянием. *Коммунальное хозяйство городов: респ. межвед. науч.-техн. сб.* Київ: Техніка, 1997. Вып. 8. С. 3-14.
40. А.С. Городецкий, И.Д. Евзеров Компьютерные модели конструкций. Киев: Факт, 2005. 297 с.
41. А.С. Городецкий Метод конечных элементов: теория и численная реализация. Программный комплекс «Лири-Windows» / А.С. Городецкий, И.Д. Евзеров, Е.Б. Стрелец-Стрелецкий и др. – К.: Факт, 1997. – 137 с.
42. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Прогини і переміщення. Вимоги проектування. [Чинний від 2007-01-01]. Вид. офіц. Київ: Мінбуд України, 2006. 15 с
43. Избранные задачи по строительной механике и теории упругости / Н.П. Абовский, Л.В. Ендживский, В.М. Савченков и др. Москва: Стройиздат, 1978. 189 с.

44. Р. Беллман Введение в теорию матриц / (Пер. С англ. Катковника В.Я., Полуэктова Р.А., Эпельмана М.С. под ред. Лидского В.Б.). Москва: Наука, 1969. 368 с.
45. Vatulia, G.L., Lobiak, O.V., Deryzemlia, S.V., Verevicheva, M.A., Orel, Y. F. Rationalization of cross-sections of the composite reinforced concrete span structure of bridges with a monolithic reinforced concrete roadway slab *MATEC Web of Conferences: 11th International Scientific Conference on Aeronautics, Automotive and Railway Engineering and Technologies, BulTrans 2019. Sozopol, Bulgaria, 2019. Vol. 664, 012014.*
46. Lobiak A., Plugin A., Kravtsiv L., Kovalova O. Modelling of motorway bridge spans under modernization with consideration of rheological properties of the materials. *MATEC Web of Conferences: 10-th International Scientific Conference on Aeronautics, Automotive and Railway Engineering and Technologies. BulTrans 2018. Sozopol, Bulgaria, 2018. Volume 234, 04004.*
47. Лобяк А.В., Ватуля Г.Л., Черногиль В.Б. Моделирование работы трубобетонных элементов при кратковременном и длительном нагружении. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ. 2017. Вип. 170. С. 32-41.*
48. Городецкий А.С. Компьютерные модели конструкций. Киев: Факт, 2007, с. 394.
49. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings.
50. Alessandro Zona, Gianluca Ranzi. Finite element models for nonlinear analysis of steel–concrete composite beams with partial interaction in combined bending and shear. *Finite Elements in Analysis and Design. Vol 47, 2011. P. 98–118.*
51. Anju. T, Smitha. K .K., Finite Element Analysis of Composite Beam with Shear Connectors. *ICETEST-2015. Vol. 24, 2016. P. 179 – 187.*
52. Рейтман М.И., Шапиро Г.С.. Методы оптимального проектирования деформируемых тел. Москва: Наука, 1976. 267 с.
53. Sherman, J. Continuous Composite Steel and Concrete Beams, *Transaction of the American Society of Civil Engineers, 1954. Vol. 119, P. 810–828.*

54. Gajanan M. Sabnis. Handbook of Composite Construction Engineering, *Van Nostrand Reinhold Company*, New York, 1979. 380 p.
55. Павліков, А.М. Нелінійна модель напружено-деформованого стану косо завантажених залізобетонних елементів у закритичній стадії: [монографія]. Полтава: ПолтНТУ, 2007. 259 с.
56. Роговой С.И. Нелинейное деформирование в теории железобетона и расчет прочности нормальных сечений. Полтава, 2002. 183 с.
57. Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: General rules - Structural fire design. EN 1994-1-2 (2005): Eurocode 4: Brussels. 2004, November. 109 p.
58. ДБН В.2.6-160:2010. Конструкції будинків і споруд. Сталезалізобетонні конструкції. Основні положення. [Чинний від 2011-09-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 99 с.
59. Барашиков А.Л., Подольский Д.М., Сирота М.Д. Надежность восстанавливаемых и усиливаемых конструкций зданий и сооружений. Черкассы: НПК «Фотоприбор», 1993. 44 с.
60. Бондаренко В.М., Шмуклер В.С. Оптимальное проектирование железобетонных оболочек. *Тезисы докладов республиканской конференции*. Киев, 1974. с. 10-12.
61. Бондаренко В.М., Шагин А.Л. Расчет эффективных многокомпонентных конструкций. Москва: Стройиздат, 1987. 175 с.
62. Shmukler V.S. About one possibility of Compromise-Criterion Construction in Structure Parameter Rationalization Task Dundee, Scotland, 2008.
63. Гвоздев А.А., Карпенко Н.И., Крылов С.М. Теоретическое и экспериментальное исследование работы железобетона с трещинами при плоском однородном и неоднородном напряженном состоянии. *Совершенствование расчета статически неопределимых железобетонных конструкций*: Сб. научн. трудов НИИЖБ; под ред. А.А. Гвоздева. Москва: Стройиздат, 1968. С. 5-43.

64. Беленя Е.И. Предварительно напряженные несущие металлические конструкции. Москва: Стройиздат, 1975. 323 с.
65. Любяк А. В., Головкин Д. В. Моделирование работы сталебетонных пустотных плит перекрытия с учетом нелинейных свойств конструкции и материалов. *Сборник научных трудов*. Полтава: ПолтНТУ. 2014. Вып. 3 (42). С. 120-126.
66. Ватуля Г. Л., Игнатенко А. В. Численное моделирование работы сталебетонных балок при трехстороннем нагреве. *Сборник научных трудов УкрГАЖТ*. Харьков: УкрГАЖТ, 2014. Вып. 148, ч. 2. С. 119-122.
67. Решение контактных задач в ANSYS 6.1. Москва: САДФЕМ, 2003. 138 с.
68. Рычков С. П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran Москва: ДМК Пресс, 2013. 784 с.
69. В. В. Веселов, Фёдоров А.М. Методы расчета сталебетонных балок *Современное промышленное и гражданское строительство*, 2018. ТОМ 14, № 2. С. 97–107.
70. Гребенюк Г.И., Пантелеев Н.Н., Чапаева С.Г. Разработка расчетных моделей и оптимизация ядер жесткости уголкового профиля связевых железобетонных каркасов. *Известия вузов. Строительство*. 2008, №10. С. 109–114.
71. Долганов А. И. Оптимизация железобетонных сооружений и конструкций по критерию надежности: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01 / Московский государственный строительный университет. Москва, 2000. 436 с.
72. Мироненко И.В. Оптимизация конструкций железобетонных балок и рам методом эволюционного моделирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК». Орел, 2013. 20 с.
73. Чихладзе, Э.Д., Черненко Н.Г. Оптимизация сталебетонных стержневых конструкций. *Известия вузов. Строительство*. 2004. №4. С. 4–9.
74. Biondini F., Bontempi F., Malerba P.G.. Fuzzy based optimization of concrete structures by using genetic algorithms. *8th ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability*. 2001. P. 413–420.

75. Rao S.S. Engineering optimization. Theory and practice. John Wiley & Sons, 2009. 813 p.
76. Рекомендации по оптимальному проектированию железобетонных конструкций. Москва: НИИЖБ Госстроя СССР, 1981. 170 с.
77. Дыховичный Ю.А., Максименко В.А.. Оптимальное строительное проектирование. Москва: Стройиздат, 1990. 303 с.
78. Чихладзе, Э.Д. Арсланханов А.Д., Борисов Э.И. Экспериментальные исследования сталебетонных балок. *Известия вузов. Строительство*, 2000. № 12. С. 4–7.
79. Шмуклер В.С. Оптимизация параметров строительных конструкций в условиях регулирования их напряженно-деформированным состоянием. *Коммунальное хозяйство городов: респ. межвед. науч.-техн. сб.* Киев: Техніка, 1997. Вып. 8. С. 3-14.
80. Баничук Н.В. Оптимизация форм упругих тел. Москва: Наука, 1980. 256 с.
81. Байков В.Н., Сигалов Э.Е. Железобетонные конструкции. Москва: Стройиздат, 1985. 728 с.
82. Барабаш М.С., Лапенко А. И. Методы компьютерного моделирования для расчета сталежелезобетонных плит перекрытия. *Сборник научных трудов.* Полтава: ПолтНТУ, 2012. Вып. 3 (33). с. 12-16.
83. Программный комплекс ЛИРА-САПР 2013 Учебное пособие / Д.А. Городецкий, М.С. Барабаш, Р.Ю. Водопьянов и др.; под ред. Академика РААСН Городецкого А.С.; Киев-Москва: Электронное издание, 2013. 376 с.
84. Ермоленко Д. А., Гасенко А. В., Демченко О. В. Численное моделирование работы сжатого трубобетонного элемента с ядрами из высокопрочного бетона. *Сборник научных трудов.* Ровно, 2015. Вып. 31. с. 273-280.
85. Кириченко В.А., Крупченко О.А., Третьак Я.В. Розрахунок сталеазалізобетонних балок із зовнішнім листовим армуванням з використанням повної діаграми деформування бетону. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*, 2016. Вип. 32. С. 169-175.

86. ДБН В.1.2-15:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи. [Чинний від 2010-03-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 83 с.
87. Чихладзе Э.Д., Арсланханов А.Д. Экспериментальные исследования сталебетонных плит. *Известия вузов. Строительство и архитектура*, 1991. № 5. С. 125–128.
88. Чихладзе Э.Д., Арсланханов А.Д. Расчет сталебетонных элементов прямоугольного сечения на прочность при внецентренном сжатии и изгибе. *Изв. вузов. Строительство*, 1992. № 1. С. 6–10.
89. Чихладзе Э.Д., Арсланханов А.Д. Расчет сталебетонных элементов прямоугольного сечения на прочность при осевом сжатии. *Бетон и железобетон*, 1993. № 1. С. 13–15.
90. Чихладзе Э.Д., Арсланханов А.Д. Теория деформирования сталебетонных плит. *Совершенствование методов расчета и проектирования конструкций и сооружений*. Харьков: ХарГАЖТ, 1996. Вып. 27. С. 4–39.
91. Ватуля Г.Л. Использование сталебетона при проектировании и строительстве сооружений промышленного и гражданского назначения в странах Европы и США. *Залізничний транспорт України*, 1999. № 4. С. 360-363.
92. Дериземля С.В. Обґрунтування та вибір раціональних конструктивних перерізів, можливості їх застосування у різних напрямках будівництва. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. Харків: УкрДУЗТ, 2021. Вип. 195. С. 20-25.
93. Johnson, R.S. Concrete-Filled Steel Tubes. *Composite Structures of steel and Concrete*. 1984. Vol.1. Chapter 5. P. 171-177.
94. Lawson R.M. Recent Trends in Composite Construction. *Concrete*, 1986. №2. Vol. 20. P. 5–7.
95. Porter M.L. Analyses of Two-way Acting Composite *Journal of Structural Engineering*, 1985. Vol. 111. № 1. P. 1–18.
96. Петренко Д.Г. Напружено-деформований стан гнучких сталебетонних колон: дисс. ... к-та. техн. наук: 05.23.01 / УкрГУЖТ. Харьков, 2018. 218 с.

97. Феодосьев В.И. Об одном способе решения нелинейных задач устойчивости деформируемых систем. *ПММ*. 1963. Т. 27, №2. С. 265-274.
98. Барабаш М.С., Кір'язєв П.М., Лапенко О.І., Ромашкіна М.А.. Основи комп'ютерного моделювання: навчальний посібник. 2-е вид. стер. Київ: НАУ, 2019. 492 с.
99. Нижник О.В. Безбалкові та часторебристі сталезалізобетонні перекриття. Полтава:Шевченко Р.В. [вид.], 2012. 379 с.
100. Шемет Р.Н. Сталежелезобетонные неразрезные локально предварительно напряженные балки: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Укр. гос. академия железнодорож. трансп. Харьков, 2007. 171 с.
101. Китов, Ю.П., Ватуля Г.Л., Вєревичєва М.А., Деризємля С.В. Рационализация сечений сталежелезобетонных балок. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, Днепропетровск: ДИИТ, 2016. Вып. 10. С. 27-34.
102. A. Lobiak, G. Vatulia, Ye. Orel, Simulation of performance of circular CFST columns under short-time and long-time load. *MATEC Web of Conferences: 6th International Scientific Conference "Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings"* – Transbud 2017., Vol. 116, 02036 (2017).
103. Павліков А. М., Крупченко О.А. Розрахунок міцності нормальних перерізів сталезалізобетонних двотаврових балок у закритичній стадії роботи бетону. Полтава: ПолтНТУ, 2011. с. 123-125.
104. Шмуклер В.С., Стебловский И.А. Поиск рациональной длины консольного участка конструктивно-анізотропного перекриття при статическом и динамическом воздействиях в условиях многовариантности загрузений. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. Вип. 149. Харків: УкрДАЗТ, 2014. с. 162-168.
105. Чихладзе Э.Д. Несущая способность сталебетонных конструкций в условиях статического и динамического нагружения: дисс. ... доктора техн. наук: 05.23.01 / Харьков, 1985. 481 с.



106. Ватуля Г.Л., Орел Е.Ф. Влияние параметров сечений на несущую способность сталебетонных конструкций. *Зб. наук. праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво*. Полтава, 2012. Вип. 3(33). С. 30-34.
107. Ватуля Г.Л., Орел Е.Ф., Синчук С.Д., Величко С.А. Задача оптимального проектирования шпренгельной балки при действии постоянной нагрузки. *Зб. наук. праць*. Харків: УкрДАЗТ, 2014. Вип. 147. С. 118-122.
108. Бамбура А.М., Аметов Ю.Г. Розрахунок позацентрово стиснутих сталезалізобетонних конструкцій за деформаційним методом. *Міжвідомчий наук.-техн. зб.: Будівельні конструкції*. Київ: ДП НДІБК, 2013. Вип. 78. С. 150-157.
109. Барабаш В.М., Павловская М.А. Железобетонные балки с внешним полосовым армированием из алюминиевых сплавов. *Весник Львовського політехнічного ін-та*. Львів, 1986. № 203. С. 10–13.
110. Kitov Yu.P., Verevicheva M.A., Vatulia G.L., Deryzemlia S.V. Design solutions of optimal systems under action of dead and live mobile load. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2018. Vol. 100. P. 124-139.
111. Дериземля С.В. Численное моделирование сталебетонной балки при температурно-силовом воздействии. *Образование, наука, производство: сб. тр. конф. VII Международный молодежный форум*. Белгород: БелГТУ им. Шухова, 2015. С. 2469-2474.
112. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования; пер. с англ. Москва: «Наука», 1965. 460 с.
113. Берг О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. Москва: Стройиздат, 1962. 96 с.
114. Дериземля С.В. Вибір раціональних моделей розрахунку сталебетонних конструкцій напружено-деформованого стану сталебетонних конструкцій. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*, 2016. Вип. 160, ч. 2. С. 76-77.
115. Васильев А.П. Состояние и перспективы развития конструкций с внешним листовым армированием сталежелезобетонных конструкций.

*Материалы совета по координации научно-исследовательских работ в области бетона и железобетона.* Москва: НИИЖБ, 1980. С. 14-26.

116. Ватуля Г.Л Рационализация конструкции сталебетонных шпренгельных балок. *Вестник БГТУ*, 2005. № 10. С. 355-359.

117. Дериземля С.В. Моделирование работы сталебетонных конструкций под воздействием силовых и температурных нагрузок. *Актуальные проблемы инженерной механики: тезисы докладов III Международной научно-практической конференции.* Одесса: ОГАСА, 2016. С. 62-65.

118. Дериземля С.В. Можливість моделювання сталебетонних конструкцій в різних програмних комплексах. *Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація: зб. наук. статей.* Полтава: ПолтНТУ, 2016. Вип. 12. С. 108-109.

119. Ватуля Г.Л., Орел Е.Ф., Левчук С.В., Андрущенко И.М. Влияние параметров проектирования на оптимальность конструкции трехшарнирных арок. *Зб. наук. праць.* Харків: УкрДАЗТ, 2013. Вип. 141. С. 191-196.

120. Гвоздев А.А. Расчет несущей способности конструкции по методу предельного равновесия. Москва: Стройиздат, 1949. 280 с.

121. Дериземля С.В., Комагорова С.Д. Про методи оптимального проектування комбінованих систем. *Проблеми сучасного будівництва: зб. наук. праць за матеріалами III всеукраїнської інтернет-конференції молодих учених і студентів.* Полтава: ПолтНТУ, 2016. С. 163-165.

122. Дериземля С.В. Вибір оптимальної конструкції трипрогонового балкового моста при дії постійного і тимчасового навантаження. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ.* Харків: УкрДУЗТ, 2018. Вип. 177. С. 99.

123. Дериземля С.В., Ватуля Г.Л., Орел Е.Ф., Опанасенко Е.В. Оптимизация конструкции балочных систем при постоянной и временной нагрузке. *III Міжнародна конференція «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд».* Одеса: ОДАБА, 2019. С. 57.

124. Геминтерн В.И., Каган Б.М. Методы оптимального проектирования. Москва: Наука, 1980. 159 с.

125. Zamaliev F. S., Morozov V. A. Full-scale tests and numerical experiments of steelreinforced. Вестник МГСУ, 2015. № 11. С. 58–67
126. Гольденблат И.И., Копнов В.А. Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов. Москва: Машиностроение, 1968. 191с.
127. Китов Ю.П., Ватуля Г.Л. Рационализация конструкций сталебетонных пролетных строений пешеходных мостов «Будівельні конструкції»: наук.-техн. збірник. Київ: НДІБК, 2005. Вип. 62. Т. 2. С. 204-209.
128. Китов Ю.П., Ватуля Г.Л. Задача оптимального проектирования пролетных строений пешеходных мостов. *Зб. наук. праць*. Луганськ: ЛНАУ, 2004. № 40 (52). С. 106-109.
129. Клименко Ф.Е., Барабаш В.М., Павловская М.А. Прочность и деформативность преднапряженных сталебетонных балок с внешней листовой арматурой. *Бетон и железобетон*. 1978. № 5. С. 10–12.
130. Китов Ю.П., Вереви́чева М.А., Дериземля С.В., Ватуля Г.Л., Орел Є.Ф. Розрахунок конструкції трипрогонового балочного моста під дією постійного і тимчасового навантаження. *ТРАНСБУД 2018*. Харків: УкрДУЗТ, 2018. С. 114-115.
131. Клованич С.Ф., Мироненко И.Н. Метод конечных элементов в механике железобетона. Одесса: ОНМУ, 2007. 110 с.
132. Коровниченко Н.В. Напряженно-деформированное и предельное состояние сталебетонных плит перекрытий: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Харьков, 2003. 194 с.
133. Моисеев Н.Н., Иванюков Ю.П., Столярова Е.М. Методы оптимизации. Москва: Наука, 1978. 351 с.
134. Ватуля Г.Л., Лобяк А.В., Дериземля С.В., Вереви́чева М.А., Орел Є.Ф. Выбор оптимального сечения сталежелезобетонных пролетных строений мостов с монолитной железобетонной плитой. *Трансбуд-2019*. Харків: УкрДУЗТ, 2019. С. 44-45.

135. Основы расчета и проектирования комбинированных и сталебетонных конструкций. [Чихладзе Э.Д., Ватуля Г.Л., Китов Ю.П. и др.]; под ред Э.Д. Чихладзе. Киев: Транспорт Украины, 2006. 136 с.
136. Дериземля С.В., Ватуля Г.Л., Опанасенко Е.В. Конструктивные решения систем с оптимальным распределением внутренних усилий. *МНТК «Сучасні технології будівництва та експлуатації автомобільних доріг»* Харьков: ХНАДУ, 2020.
137. Практичний розрахунок елементів залізобетонних конструкцій за ДБНВ.2.6-98:2009 у порівнянні з розрахунками за СНиП 2.03.01-84\* і EN 1992-1-1 (Eurocode 2) / В.М. Бабаєв, А.М. Бамбура, О.М. Пустовойтова та ін.; за заг. ред. В.С. Шмуклера. Х.: Золоті сторінки, 2015. 208 с.
138. Рабинович Р.И., Орлов Г.Г. Расчет двухслойных балок с упругопластическими составляющими стержнями *Строительная механика и расчет сооружений*. 1988. № 2. С. 24–28.
139. Рейтман, М.И. Залог прочности. Москва: Стройиздат, 1979. 136 с.
140. Ржаницын А.Р. Расчет сооружений с учетом пластических свойств материалов / 2-е изд. Москва: Стройиздат, 1954. 288 с.
141. Рожваны Д. Оптимальное проектирование изгибаемых тел / пер. с англ. Москва: Стройиздат, 1980. 273 с.
142. Стерелецкий Н.Н. Сталежелезобетонные пролетные строения мостов / 2-е изд. Москва: Транспорт, 1981. 360 с.
143. Веревичева М.А., Берестянская А.А., Дериземля С.В. Выбор рациональных параметров фибрового армирования. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. Днепропетровск: ПДАБА, 2015. Вып. 82. С. 60-69.
144. Тимошенко В.М. Розрахунок сталезалізобетонних конструкцій. *Наук.-техн. зб. «Будівельні конструкції». Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація*. Київ: ДП НДІБК, 2006. № 65. С.70–73.

145. Чичинадзе В.К. Решение невыпуклых нелинейных задач оптимизации. Москва: Наука, 1983. 256 с.
146. Шагин А.Л., Избаш М.Ю., Асанов В.В., Шемет Р.Н. Особенности предварительного напряжения сталежелезобетонных конструкций. *Будівельні конструкції*. Міжвід. наук.-техн. зб.: Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону. 2003. Вип. 59, т. 1. С.565-570.
147. Шимановський О.В., Карпіловський В.С., Криксунов Е.З. Проектно-обчислювальний комплекс SCAD – інструмент для створення нових технологій дослідження об'єктів атомної енергетики. *Будівництво України*. Київ, 1998. № 1. С. 37–40.
148. Яшин А.В. Критерий прочности и деформирования бетона при простом нагружении для различных видов напряженного состояния. *Расчет и конструирование железобетонных конструкций*, 1977. Вып. 39. С. 48–57.
149. Frajicomo M., Amadio C., Macorini L. Finite-Element Model for Collapse and Long-Term Analysis of Steel-Concrete Composite Beams. *Journal of Structural Engineering*, 2004. №3. P. 489–497.
150. Shmukler V.S., Feirusha S., Kakshar H., Beregna K.V., Vassim Ismail. Rationalization Criteria of Structure's Parameters. *Zanco Journal for Pure and Applied Sciences*, Salahaddin University Hawler, Iragi Kurdistan Region, 2010. No.6, Volume 22. P. 56–64.
151. Карпенко, Н.И. К построению условия прочности бетонов при неодноосных напряженных состояниях. *Бетон и железобетон*, 1985. № 10. С. 35–37.
152. Козачевский А.И., Крылов С.М. Исследование перераспределения усилий в сложных стержневых системах с учетом неупругих свойств железобетона *Совершенствование расчета статически неопределимых железобетонных конструкций: Тр. ин-та НИИЖБ*. Москва: Стройиздат, 1968. С. 43–62.

153. Корсун В.І., Недорезов А.В., Макаренко С.Ю. Порівняльний аналіз критеріїв міцності для бетонів. *Сучасне промислове та цивільне будівництво*, 2014. Т. 10, № 1. С. 65–78.
154. Моисеев Н.Н., Краснощеков П.С. Математические методы в исследовании операций. Москва: Изд. МГУ, 1981. 192 с.
155. Прочностные и деформационные характеристики элементов бетонных и железобетонных конструкций / [сб. науч. трудов / под. ред. д.т.н., проф. Гвоздева А.А.]. Москва: НИИЖБ, 1981. 147 с.
156. Бондаренко В.М. О методике назначения параметров нелинейности деформирования бетона / В.М. Бондаренко, П.П. Романов, Э.Д. Чихладзе и др.; *Прочность и деформативность железобетонных конструкций*. Харьков, 1969. С. 13–32.
157. Красновский Р.О. О методике испытания железобетонных балок на действие поперечных сил. *Методика лаб. исследований деформаций и прочности бетона, арматуры и ж/б конструкций*. Москва: Госстройиздат, 1962. С. 160-173.
158. Людковский И.Г., Фонов В.М., Кузьменко С.М., Самарин С.И. Сталобетонные фермы из гнутосварных профилей. *Бетон и железобетон*, 1982. № 7. С. 30–31.
159. Семенюк С.Д., Фролков И.С., Мамочкина М.Г., Дивакова Г.А. Прочность и деформативность бетона средних классов по результатам испытаний. *Вестник Белорусско-Российского университета*. Могилев, 2013. Вып. № 3. С. 92-100.
160. Стороженко Л.І. Проблеми проектування і будівництва сталезалізобетонних конструкцій. *Зб. «Будівельні конструкції»*. Київ: НДІБК. Вип. 700. 2008. С. 21–28.
161. Стороженко Л.І., Сурдін В.М., Єфіменко В.І., Вербицький В.І. Сталезалізобетонні конструкції. Дослідження, проектування, будівництво, експлуатація. Кривий Ріг: КТУ, 2007. 448 с.

162. Чихладзе Э.Д., Пинчук В.В. Оптимальное проектирование платформ с трёхсторонней разгрузкой. *Проблемы оптимизации в машиностроении*. Харьков, 1982. С. 317.
163. Weiwei LIN Experimental and Numerical Study on Mechanical Behavior of Steel-Concrete Composite Bridges Subjected to Hogging Moment: Phd dissertation / WASEDA University. 2012. 162 p.
164. Семко О. В. Імовірнісні аспекти розрахунку сталезалізобетонних конструкцій. Полтава: ПолтНТУ, 2004. 309 с.

