

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ



**АЛЬТАЙЕ НАТХІР АЙЄД АТХААБ**  
**Natheer Aied Athaab Al-Taie**

УДК 624.014

АВТОРЕФЕРАТ ДИСЕРТАЦІЇ

**РАЦІОНАЛЬНА КОМБІНОВАНА КОНСТРУКЦІЯ**  
**ЗВАРНОГО СТАЛЕВОГО АРКОВОГО МОСТУ**  
**ДЛЯ УМОВ ІРАКУ**

05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі і споруди

Галузь знань: 019 – Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Київ 2018

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана в Київському національному університеті будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник** доктор технічних наук, професор  
**Білик Сергій Іванович,**  
Київський національний університет будівництва  
і архітектури, завідувач кафедри металевих та дерев'яних  
конструкцій

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Першаков Валерій Миколайович,**  
Національний авіаційний університет, професор  
кафедри реконструкції аеропортів та автошляхів

доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Семко Володимир Олександрович,**  
Полтавський національний технічний університет  
імені Юрія Кондратюка, доцент кафедри конструкцій із ме-  
талу, дерева і пластмас

Захист відбудеться «18» травня 2018 р. о 13<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.04 у Київському національному університеті будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, Повітрофлотський проспект, 31, а.319.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, Повітрофлотський проспект, 31.

Автореферат розісланий «17» квітня 2018 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
к.т.н., доцент



Д. В. Михайловський

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Одним з визначальних аспектів розвитку суспільства в сучасному світі є поширеність різноманітних комунікацій, комунікаційних зв'язків, технічних засобів пересування і зв'язку. Економічні та соціополітичні умови держави Республіка Ірак сприяють подальшій урбанізації країни та, на цьому тлі, такому важливому напрямку будівництва, як створення найкращих технічних рішень мостів і мостових переходів зі сталевих конструкцій на різноманітні навантаження для природних умов країни.

Одним з основних шляхів підвищення ефективності та економічності мостів є створення нових ефективних сталевих конструкцій. У відповідності до сучасних світових тенденцій містобудування, одним з найбільш ефективних є застосування мостів аркового типу з суцільностінчастими арками і балками жорсткості, які об'єднані вантами. Вирішення науково-технічної проблеми зі створенням комбінованих аркових споруд пов'язане із низкою задач розвитку та удосконалення теоретичного апарату розрахунку й конструювання сталевих конструкцій мостів і мостових переходів. Тому для умов Республіки Ірак є актуальним використання зварних мостових комбінованих аркових споруд зі сталі. Будь яка аркова комбінована пролітна будова прольотом від 60 до 150 м є унікальною сталевою конструкцією. Подальше дослідження аркових сталевих зварних конструкцій пролітних будов мостів та виявлення закономірностей створення їх раціональних конструктивних систем розширює можливості будівництва таких мостів в Республіці Ірак.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертація виконувалась в рамках завдань розвитку і будівництва доріг та мостів в Республіці Ірак.

**Метою досліджень** є узагальнення, розвиток теоретичних підходів та виявлення нових закономірностей щодо уточнення напружено-деформованого стану комбінованих аркових сталевих мостів із використанням зварних профілів коробчастого перерізу, розробка інженерних науково-обґрунтованих методик визначення та узагальнення параметрів проектування таких споруд на початкових стадіях проектування для умов Іраку.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні **задачі**:

- удосконалити методіку визначення оптимальної висоти перерізу сталевих елементів коробчастого профілю за сумісної дії згинального моменту, поздовжньої та поперечної сили для сталевих аркових комбінованих конструкцій мостових пролітних будов;
- розповсюдити підхід перевірки стійкості комбінованих аркових сталевих конструкцій пролітних будов мостів за деформованою схемою на симетричне та несиметричне навантаження при використанні коробчастих зварних балкових елементів;
- визначити ефективні конструктивні рішення аркових комбінованих зварних сталевих конструкцій для умов Іраку;
- провести числові дослідження параметрів ваги, запропонувати методіку розрахунку аркових комбінованих конструкцій мостів із застосуванням фактору ваги, як відношення умовної теоретичної ваги конструкцій до величини корисного навантаження;

– розробити і чисельно дослідити варіанти комбінованих конструкцій аркових мостів, встановити питому вагу окремих конструктивних елементів та розрахункові коефіцієнти для арок на початкових стадіях проектування.

**Об’єкт досліджень** – робота сталевих аркових елементів в складі комбінованих конструкцій мостового типу із використанням зварних профілів коробчастого перерізу та їх порівняльна ефективність для типових умов Іраку.

**Предмет досліджень** – раціональні конструктивні рішення аркових сталевих мостів із використанням зварних профілів коробчастого перерізу; напружено-деформований стан елементів аркових пролітних будов; оптимальні параметри коробчастих перерізів під дією згинальних моментів, поздовжніх сил та дотичних напружень, узагальнення параметрів проектування під час розрахунку на стійкість і міцність гнучких арок пролітних будов мостів.

**Методи досліджень** – методи класичної механіки, аналітичні методи математичного моделювання, числові методи математичного моделювання з використанням обчислювальних комплексів при розрахунку комбінованих аркових мостових сталевих конструкцій.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

Дисертація є науковою працею автора, в якій ним особисто одержані наступні наукові результати:

– узагальнено теорію пошуку раціональних сталевих зварних елементів коробчастого перерізу за сумісної дії згинального моменту, поздовжньої та поперечної сил для аркових комбінованих конструкцій мостових переходів та міських мостів;

– отримала подальший розвиток методика раціонального проектування коробчастих перерізів, отримані аналітичні залежності та розроблено методика визначення оптимальної висоти перерізу коробчастого профілю за сумісної дії згинального моменту, поздовжньої та поперечної сил для аркових комбінованих конструкцій залежно від гнучкості стінки, впливу конструктивних параметрів перерізу та співвідношення діючих внутрішніх зусиль;

– встановлено закономірності впливу гнучкості пружних арок комбінованих аркових систем мостів при перевірці їх стійкості;

– виявлені закономірності структури витрат сталі в комбінованих аркових конструкціях на балку жорсткості та арку залежно від конструктивних особливостей комбінованої системи і коефіцієнти для прогнозного визначення маси сталевих конструкцій пролітної будови; отримали подальший розвиток теоретичні положення методики розрахунку аркових комбінованих конструкцій мостів із застосуванням фактору ваги, проведено аналіз витрат сталі на комбіновані аркові конструкції зі зварних профілів коробчастого перерізу залежно від конструктивної схеми та умов опираючості;

– узагальнена залежність між витратами сталі на сталеві конструкції мостів комбінованої аркової схеми та рухомим навантаженням; підтверджено вплив на напружено-деформований стан комбінованих аркових конструкцій несиметричного рухомого навантаження;

– отримав подальший розвиток підхід стосовно перевірки стійкості аркових комбінованих систем за деформованою схемою, побудовані й чисельно досліджені з використанням обчислювальних комплексів ETABS-2015 та CSI Bridge-2014 фізико-

математичні моделі аркових мостів для порівняльного аналізу ефективності визначених параметрів геометричної схеми та поперечного перерізу, виконані перевірки стійкості комбінованих аркових систем за деформованою схемою і теоретичними-нормативними методиками.

**Практичне значення одержаних результатів.** Використання результатів роботи дозволяє вирішити актуальну задачу зниження вартості комбінованих аркових сталевих пролітних будов мостів з елементів коробчастого перерізу, в тому числі для умов Іраку. Результати досліджень впроваджено: розроблена методика розрахунку аркових комбінованих сталевих зварних конструкцій мостів буде надана для впровадження в нормативні документи Республіки Ірак.

**Особистий внесок здобувача.** Результати дисертаційної роботи, отримані автором, знайшли відображення у спільних публікаціях [1-7], зокрема в [1] проведені аналітичні й числові дослідження оптимальної висоти балок жорсткості аркових комбінованих сталевих конструкцій мостів, встановлені числові значення параметрів для балок при визначенні раціональної висоти під дією згинальних моментів і поздовжніх сил, проведено числові дослідження стійкості арок мостів з урахуванням вимог європейських і американських норм; в [2] узагальнено особливості виготовлення зварних сталевих балок мостів коробчастого і двотаврового перерізу; в [3] узагальнено конструктивні особливості проектування зварних сталевих балок; в [4] досліджено напружено-деформований стан коробчастих балок сталевих мостів з урахуванням температурних ефектів; в [5] виконано узагальнені теоретичні дослідження з визначення конструктивних коефіцієнтів раціональної висоти сталевий коробчастої балки постійного перерізу з урахуванням складного напружено-деформованого стану; в [6] виконано теоретичні дослідження напружено-деформованого стану опорних вузлів сталевих зварних мостів з метою визначення приведених напружень; в [7] виконано числові та дослідження варіантів зварних сталевих аркових мостів трьох типів і встановлено закономірності взаємозв'язку між значеннями рухомого навантаження і власною вагою типу конструкцій мостів.

**Апробація результатів роботи.** Основні положення та результати роботи обговорювались на: науково-практичній конференції «Будівлі та споруди спеціального призначення. Сучасні матеріали та конструкції», м. Київ, 2–3 червня 2016, КНУБА; Дев'ятій Всеукраїнській науково-технічній конференції «Механіка ґрунтів, геотехніка та фундаментобудування. Проблеми, інновації та імплементація Єврокодів в Україні» 3–7 жовтня 2016, м. Дніпро, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури; Першому міжнародному науково-практичному семінарі «Проектування і 3D-технології виготовлення металевих конструкцій», м. Київ, 17–19 травня 2017, КНУБА.

В повному обсязі дисертація доповідалась на кафедрі металевих та дерев'яних конструкцій Київського національного університету будівництва і архітектури (2017 р.).

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг роботи складає 158 сторінок, у тому числі: 138 сторінок основного тексту, 20 сторінок списку використаних джерел. Робота ілюстрована 60 рисунками у вигляді схем, графіків і фотографій та включає 19 таблиць.

Автор дисертації висловлює повагу і вдячність своєму науковому керівнику професору, доктору технічних наук Білику С.І.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У **вступі** обґрунтована актуальність наукової проблеми і практичне значення її вирішення, сформульовано мету і задачі дослідження, окреслені основні напрямки і методи вирішення поставленої задачі.

**Перший розділ** присвячений аналізу сучасного стану використання аркових сталевих конструкцій в будівництві міських мостів і мостових переходів та перспективних напрямків їх подальшого розвитку й вдосконалення. Вказується на необхідність розвитку мостобудування в умовах Республіки Ірак, важливість застосування сталевих зварних конструкцій у специфічних умовах ціноутворення та використання переважно американського обчислювального контенту при проектуванні мостових переходів. Наводяться приклади реалізованих аркових мостів, що є піонерними в своєму класі або ж мають видатні конструктивні параметри. Наводиться класифікація аркових комбінованих конструкцій відносно рівня встановлення балки жорсткості, а також наявності та виду решітки в'язей. Приведені дані та вклад вчених в розробку міцності аркових конструкцій.

Перші дослідження стійкості аркових систем належать видатним вченим О.М. Диннику та С.П. Тимошенко. Основні рівняння стійкості гнучких арок за методикою Тимошенка-Саусвелла (Southwell R.V.) покладені в основу розрахунку мостових арок в нормах проектування AASHTO LRFD (США), практичні рекомендації до яких розроблені Nettleton D.A.

Сучасні багатогранні дослідження складних систем з криволінійним обрисом зосереджені, переважно, навколо задач стійкості, які виконали В.А. Баженов, Д.В. Вайнберг, Е.І. Григолюк, О.В. Геммерлінг, Соловей М.О. Дослідження стійкості рамних й аркових систем змінного і постійного перерізу та розвиток методик їх розрахунку викладені в роботах В.А. Баженова, С.І. Білика, А.В. Перельмутера, А.Ф. Смирнова, М.К. Снітко.

Дослідження зі стійкості й міцності аркових систем за кордоном належать вченим: Blekherman A.N., Bradford M.A., Brunn B., Chenga J., David J. Braun, Dimopoulos C.A., Galambos T.V., Gantec C.J., Gui X.M., Huang N.C., Pi Y.L., Schreyer H.L., Trahair N.S., Tveit P., Xu Y.J.

В сучасне металобудівництво мостів в Україні значний вклад внесли Дехтяр А.С., Коваль П.М., Корнієв М.М., Лантух-Лашенко А.І, Лобанов Л.М., Полюга Р.І.

Основні наукові принципи визначення надійності будівельних конструкцій були сформульовані М.С. Стрелецьким, О.Р. Ржаніциним, В.В. Болотіним. Подальшого розвитку теорія надійності набула в роботах А.М. Бамбури, А.Я. Барашикова, О.П. Воскобійник, Р.І. Кінаша, В.П. Корякіна, М.Б. Краковського, О.П. Кудзіса, А.І. Лантух-Лашенка, А.В. Махінька, В.А. Пашинського, А.В. Перельмутера, С.Ф. Пічугіна, В.Д. Райзера, М.В. Савицького, О.В. Семка, В.О. Семка, С.Б. Усаковського.

Питання експлуатаційної надійності будівель і споруд, у тому числі конструкцій мостів досліджувалось в наукових роботах Т.Н. Азізова, Е.М. Бабича, О.А. Біля-

тинського, З.Я. Бліхарського, О.І. Голоднова, Є.А. Єгорова, Д.А. Єрмоленка, М.Ю. Ізбаша, Є.В. Клименка, В.М. Кущенко, О.І. Лапенка, В.М. Першакова, Л.І. Стороженка, О.В. Шимановського, В.С. Шмуклера. Довговічність сталевих конструкцій в різноманітних складних умовах експлуатації та проблема прогресуючого руйнування будівель і споруд вивчалась в роботах М.С. Барабаш, А.С. Білика, С.І. Білика, О.А. Білятинського, О.М. Гибаленка, П.В. Корольова, В.М. Першакова, В.О. Семка, О.В. Семка.

Резервом ефективності сталеві арки є призначення оптимальної висоти її перерізу. Такі задачі в оптимальних постановках були розв'язані свого часу такими вченими як В.О. Балдін, В.М. Гордєєв, С.Д. Лейтес, В.О. Перм'яков, В.В. Трофимович. Конструктивну модель, з врахуванням основних та допоміжних деталей, розглянув Я.М. Ліхтарников, отримані результати вважаються обмежено оптимальними, тобто раціональними.

Показано, що норми проектування Єврокод, ДБН України, як і норми US AASHTO LRFD (США) базуються на одних і тих самих базових теоретичних засадах та не протирічать одна одній. Незважаючи на деякі розбіжності стосовно застосування коефіцієнтів надійності, безпеки тощо, отримані теоретичні результати можуть бути застосовані відносно будь-якої з вказаних офіційних методик, а проведений аналіз – ефективно покращити існуючі теоретичні та конструктивні рішення.

У **другому розділі** вирішується задача стійкості арки в складі комбінованої системи пролітної будови моста. Арка розглядається як пружна з гнучкістю в межах 100...140 в площині навантаження. До уваги прийняті такі фактори як: типи і характер навантажень, наявність симетричних та кососиметричних форм деформування в результаті втрати стійкості, можливість початкових недосконалостей та ексцентриситетів прикладання навантаження.

Критерієм стійкості у відповідності до вимог US AASHTO LRFD є виконання умови  $\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_b}{F_b} \leq 1$  з урахуванням критерію Тимошенка-Саусвелла, що враховує збільшення згинального моменту в деформованому стані від дії поздовжньої сили. Тут нормальні напруження  $f_a$  – від поздовжньої сили,  $f_b$  – від згинального моменту з врахуванням деформованої схеми:

$$f_a = \sigma_N = \frac{N}{A}; f_b = \frac{M_{x0}}{W_x \left(1 - \frac{1,7f_a}{F_e}\right)}, \text{ тобто: } \frac{N}{AR_y} + \frac{M_{x0}}{R_y W_x \left(1 - \frac{k_{Ty} \sigma_N}{\sigma_{cr}}\right)} \leq 1, \quad (1)$$

де  $k_{Ty}=1,7$  для розрахункового навантаження,  $k_{Tp}=1,18$  для руйнівного навантаження, коефіцієнт безпеки при втраті стійкості центрально стиснутого стержня приймається  $k_{fy}=2,12$ , початкові недосконалості враховуються величиною  $\delta_{f0}=(1/600...1/1500) L$  залежно від прольоту арочної конструкції,  $F_y=R_y$  у відповідності до позначень ДБН,  $F_e=\sigma_{cr}$  – критичні напруження втрати стійкості арки за Ейлером.

Коефіцієнти розрахункової довжини арки радіусу  $R$ , як визначальний параметр стійкості, умовно розраховуються за дії гідростатичного навантаження, тобто стискувальних зусиль  $N_{cr} = q_{cr} R$  та відповідних напружень без врахування обтискання арки:

$$\sigma_{cr} = \frac{N_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 EI_x}{A(kL)^2} \rightarrow r_x^2 = \frac{I_x}{A} \rightarrow \lambda_x^2 = \frac{(kL)^2}{r_x^2} \rightarrow \lambda_x = \frac{(kL)}{r_x}; \quad \sigma_{cr} = \frac{N_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 E}{\lambda_{arc}^2} \quad (2)$$

Показано, що першою формою втрати стійкості арки є косиметрична форма.

Із введенням до виразу відносного ексцентриситету  $m_x = \frac{M_{x0}A}{NW_x} = \frac{\sigma_M}{\sigma_N}$  стає таким:

$$F_a = \frac{F_e}{2,12} \frac{F_a}{F_y} = \frac{F_e}{2,12 F_y} = \frac{f_a}{F_a} = \frac{f_a / F_y}{F_a / F_y} \rightarrow \frac{f_a}{F_a} = \frac{f_a / F_y}{\frac{F_e}{2,12 F_y}} \quad (3)$$

$$\frac{\sigma_N}{R_y} \left[ \frac{2,12 R_y}{\sigma_{cr}} + \frac{m_x}{1 - \frac{1,7 \sigma_N}{\sigma_{cr}}} \right] \leq 1, \quad (4)$$

або в записі іншої форми при  $\sigma_M = M_{x0} / W_x$ :

$$\frac{1}{\Phi} = \frac{\sigma_N}{R_y} \left[ \frac{k_{fy}}{\sigma_{cr} / R_y} + \frac{\sigma_M}{\sigma_N} \frac{1}{\left(1 - \frac{k_{Ty} \sigma_N}{\sigma_{cr}}\right)} \right] \leq 1, \quad \text{або} \quad \frac{1}{\Phi} = \frac{\sigma_N}{R_y} \left[ \frac{k_{fy}}{\sigma_{cr} / R_y} + m_x \frac{1}{\left(1 - \frac{k_{Ty} \sigma_N}{\sigma_{cr}}\right)} \right] \leq 1, \quad (5)$$

На рис.1-2 наведено результати числових досліджень критерію стійкості в формі (5) залежно від гнучкості арки  $\lambda_{arc} = kL / r$ .

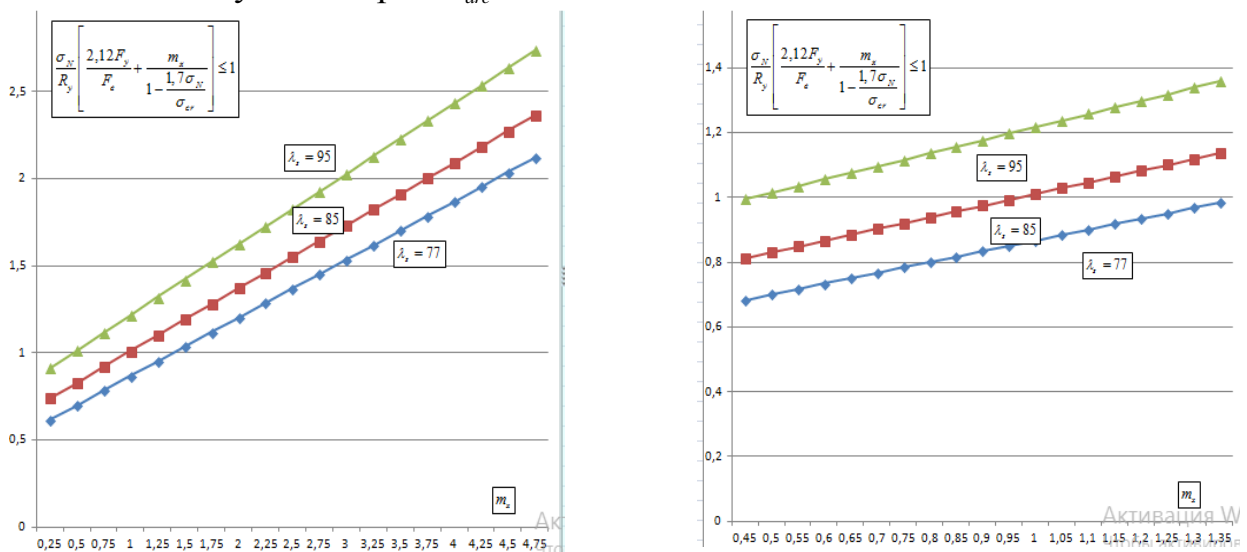


Рис. 1. Параметр критерію стійкості  $\Phi$  арки залежно від гнучкості при відносному ексцентриситеті  $m_x = 0,25 \dots 4,75$ ,  $k_{fy} = 2,12$ ,  $k_{Ty} = 1,7$

Числовими дослідженнями отримані граничні значення відносних ексцентриситетів для діапазону гнучкостей при  $R_y = 325$  МПа,  $k_{fy} = 2,12$ ,  $k_{Ty} = 1,7$ . Так при  $\lambda_{arc} = 77$  граничне значення  $m_x = 1,5$ ; при  $\lambda_{arc} = 85$  –  $m_x = 1,0$ ; а при  $\lambda_{arc} = 95$  –  $m_x = 0,5$ .

На рис.2 показані залежності функції стійкості від гнучкості при відносному ексцентриситеті  $m_x = \sigma_M / \sigma_N = (0,75 \dots 1,)$ , коефіцієнтах запасу  $k_{fy} = 2,12$ ,  $k_{Ty} = 1,7$ , початкових недосконаlostях  $\delta_{f0} / L = 1/1000$  та відношення  $h_0 / L = 1/50$ ;  $\sigma_N / R_y = 0,2$ . Врахування коефіцієнтів запасу призводить до зниження гранично допустимої гнучкості арки.



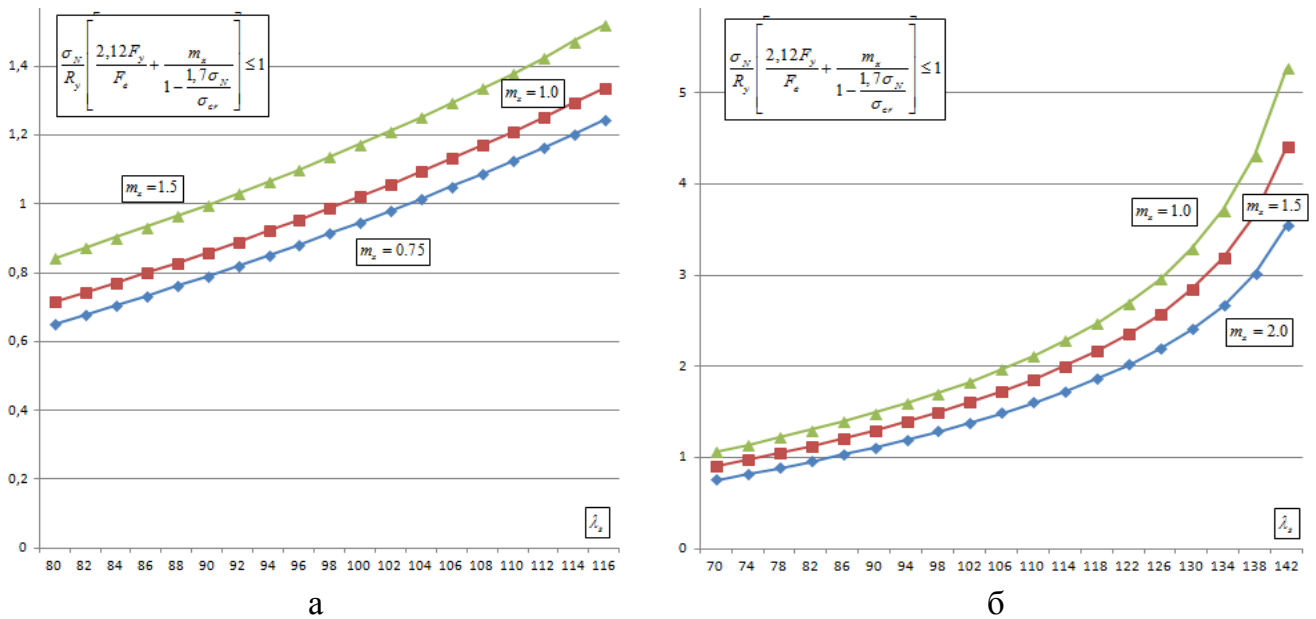


Рис. 2. Параметр критерію стійкості  $\Phi$  арки залежно від гнучкості при:  
 а –  $m_x=0,75\dots 1,5$ ,  $k_{fy}=2,12$ ,  $k_{Ty}=1,7$ ; б –  $m_x=1,0\dots 2,0$ ,  $k_{fy}=2,12$ ,  $k_{Ty}=1,7$

Таким чином, показано активну залежність фактору стійкості  $\Phi$  від співвідношення параметрів напружено-деформованого стану, характерні граничні значення гнучкостей відповідають показаним на графіках значенням при  $\Phi=1$ . Проведеними дослідженнями встановлено, що при високих значеннях гнучкостей (понад 110...130) стрімко зростають критичні напруження.

Подальше вдосконалення методики перевірки стійкості за деформованою схемою з врахуванням досліджень Тимошенка С.П., де максимальний прогин визначається з урахуванням ексцентриситету поздовжньої сили  $e_M$ , початкового вигину осі елемента та величини початкових недосконалостей  $\delta_{f0} + \delta_f$ , які регламентуються нормами як  $1/800\dots 1/1200 L$ :

$$\delta_{fM} = e_M \left[ \frac{1}{\cos(k/2)} - 1 \right] + \frac{\delta_{f0} + \delta_f}{\frac{\pi^2}{k^2} - 1} \rightarrow k^2 = \frac{N\mu^2 L^2}{EI} \rightarrow e_M = \frac{M}{N}. \quad (6)$$

Після введення позначень критичних сил  $N_{cr,E}$  та  $\sigma_{cr} = N_{cr,E} / A$ ,  $k^2 = \frac{N\mu^2 L^2}{EI}$  відносного ексцентриситету  $m_f = \sigma_M / \sigma_N$  при  $e_M = M_x / N$  та ядрової відстані  $\rho = W_x / A$  критерій стійкості при перевірці за деформованою схемою набуває виду :

$$\frac{\sigma_N}{R_y} \left[ 1 + \frac{\frac{\sigma_M}{\sigma_N} \left( \frac{\delta_{f0} + \delta_f}{(\sigma_M / \sigma_N) \rho} + 1 \right)}{\left( 1 - \frac{\sigma_N}{\sigma_{cr}} \right)} \right] \leq 1, \quad \frac{\sigma_N}{R_y} \left[ 1 + \frac{m_f \left( \frac{\delta_{f0} + \delta_f}{m_f \rho} + 1 \right)}{\left( 1 - \frac{\sigma_N}{\sigma_{cr}} \right)} \right] \leq 1. \quad (7)$$

За необхідності аналізу конструктивних та безпекових факторів (коефіцієнти безпеки стосовно поздовжнього стиску  $k_{fy}$  та деформацій від згинального моменту  $k_{Ty}$ ) слід використовувати дещо видозмінений вираз:

$$\frac{\sigma_N}{R_y} \left[ \frac{1}{k_{fy}} + \left( 1 + \frac{(\delta_f)}{M/N} \right) \frac{\sigma_M / \sigma_N}{\left( 1 - k_{Ty} \frac{\sigma_N}{R_y} \frac{\lambda_s^2}{\pi^2 E} \right)} \right] \leq 1 \quad (8)$$

Отримані залежності дозволяють виконувати дослідження стійкості аркової пролітної будови за певним алгоритмом деформаційного розрахунку, який наведений у дисертації.

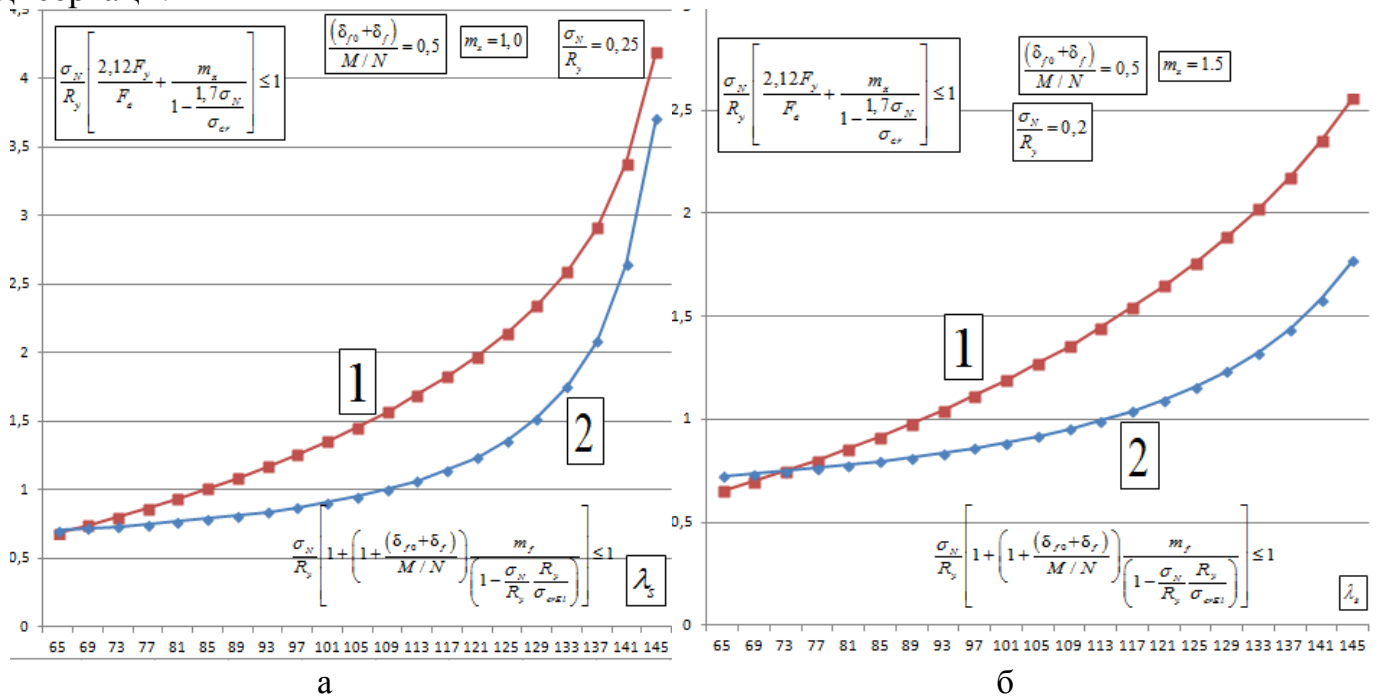


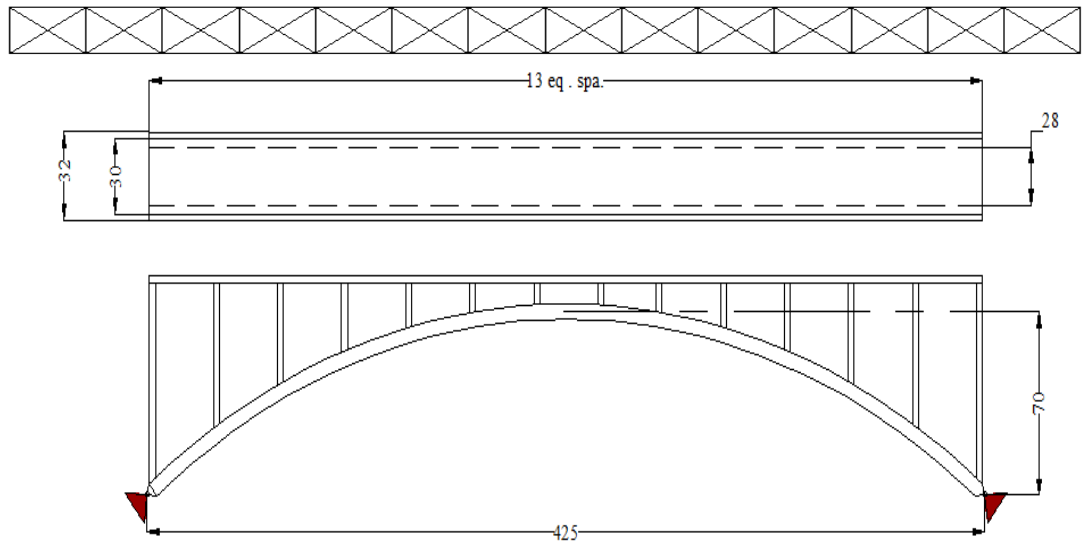
Рис. 3. Параметри критеріїв стійкості, визначені за методикою ААSНТО (1) та з розрахунку за деформованою схемою (2): а – при  $m_x = 1,0$ ; б – при  $m_x = 1,5$

Проведено дослідження для порівняння ефективності методик розрахунку при різних значеннях параметрів (рис. 3).

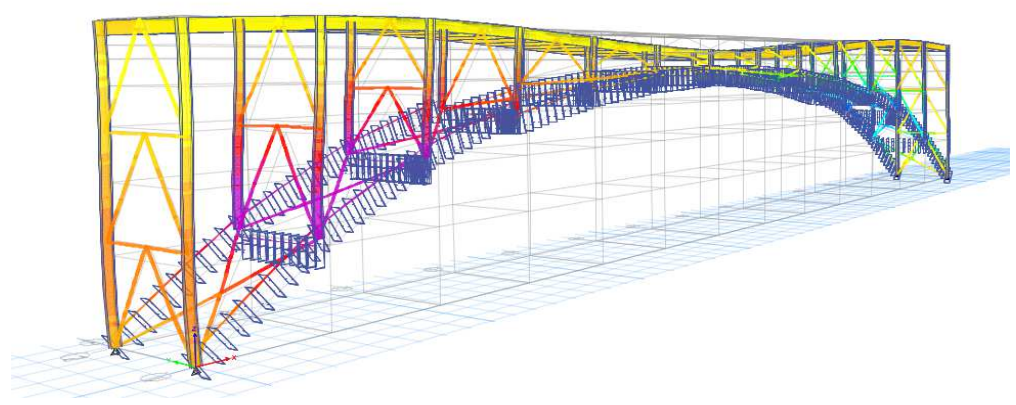
Дослідження показали надійність результатів в діапазоні значень  $\sigma_N / R_y \leq 0,2$ ,  $m_x = 0,25 \dots 2,0$ , при більших значеннях відносного ексцентриситету та для гнучких арок з великими значеннями прогинів значення деформаційного розрахунку зростає.

Результати дослідження продемонстровані на прикладі комбінованої аркової системи, з їздою по верху, прольотом 130 м за програмою ETABS-2015 (рис. 4).

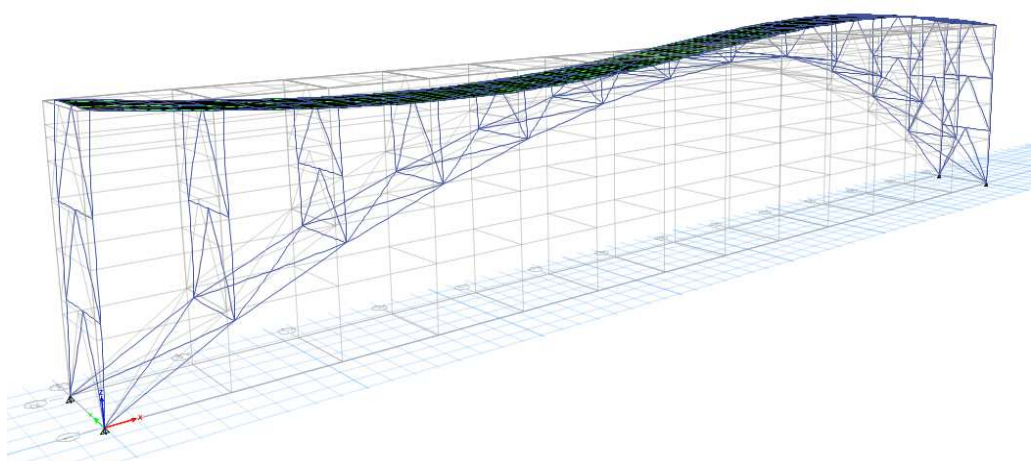
Виконано приклад розрахунку. Отримані результати перевірки стійкості арки сталеві пролітної будови за американським стандартом та деформаційним розрахунком продемонстрували певні відмінності (табл. 1). Слід зазначити, що, на відміну від методики ААSНТО, розрахунком за деформованою схемою прямо не враховані коефіцієнти безпеки. Введенням таких коефіцієнтів, як коефіцієнт умов роботи  $\gamma_c = 0,9$ , коефіцієнт надійності для ключових елементів за ДБН «Мости і труби»  $\gamma = 1,1$ , коефіцієнта надійності за призначенням для мостів до 300м  $\gamma_n = 1,1$  та інших, зближує ці розрахунки (сумарний коефіцієнт надійності  $\gamma_{arc} = 1,1 \cdot 1,1 / 0,9 = 1,34$ ). Це дозволяє зробити висновок про достовірність розрахунку за деформованою схемою та надійність конструкції, розрахованої таким чином (рис. 4).



а



б



в

Рис. 4. Приклад розрахунку: конструктивне рішення аркового моста (а) та просторові форми деформування аркової пролітної будови при симетричному (б) та несиметричному (в) навантаженні за розрахунком ETABS-2015

## Порівняння результатів перевірки стійкості сталеві аркової пролітної будови

Вид розрахунку	Основний вираз розрахунку	Значення критерію стійкості
US AASHTO LRFD	$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_b}{F_b} \leq 1;$	0,94
		<b>100%</b>
Деформаційний розрахунок	$\frac{\sigma_N}{R_y} \left[ 1 + \left( 1 + \frac{(\delta_f)}{M/N} \right) \frac{\sigma_M / \sigma_N}{\left( 1 - \frac{\sigma_N \lambda_s^2 R_y}{R_y \pi^2 E} \right)} \right] \leq 1$	0,85
		<b>90,2%</b>

У **третьому розділі** розглядається фізико-математична класична модель коробчастої сталеві арки з метою визначення оптимальної висоти її перерізу. Через неповне врахування деталей конструктивної моделі отримані результати вважаються обмежено оптимальними, тобто раціональними.

Конструктивною моделлю є однопролітна зварна балка постійного коробчастого перерізу, вимоги місцевої стійкості в якій виконуються відповідно до норм проектування, плоска форма деформування забезпечується в'язями.

Балка розглядається як така, в якій згинальний момент  $M_x$  сприймається стінками  $M_{xw}$  та полицями  $M_{xf}$  пропорційно до їх геометричних характеристик, а повна теоретична вага  $m_C$  складається з ваги полиць  $m_{f0}$  та стінок  $m_{\omega 0}$ ; врахування впливу на оптимальний параметр балки ваги додаткових деталей  $m_{ir}$  виконується через конструктивні коефіцієнти:

$$\begin{aligned} \text{балки в цілому:} \quad \psi_C &= \frac{m_0 + \sum m_{ir}}{m_0} = \frac{m_C}{m_0}, \quad m_{bC} = m_0 + \sum m_{ir}, \quad (9) \\ \text{СТІНОК:} \quad \psi_{p\omega} &= \frac{m_{\omega 0} + \sum m_{ir\omega}}{m_{\omega 0}}; \quad \psi_{p\omega} = 1 + \frac{\sum m_{ir\omega}}{m_{\omega 0}}, \\ \text{ПОЛИЦЬ:} \quad \psi_{pf} &= \frac{m_{f0} + \sum m_{irf}}{m_{f0}}, \quad \psi_{pf} = 1 + \frac{\sum m_{irf}}{m_{f0}}. \end{aligned}$$

Згідно з методикою, запропонованою на кафедрі МДК КНУБА проф. С.І. Біликом, умова міцності балки з врахуванням інших, відмінних від нормальних напружень, факторів напружено-деформованого стану записується через коефіцієнт  $k_R$ , таким чином:

$$A_f = c_f \frac{W_x}{h_0} \rightarrow W_x = \frac{k_R M_{x0}}{R_y} \rightarrow A_f = \frac{c_f k_R M_{x0}}{R_y h_0} \quad m_{bC} = 2\rho\psi_{pf} c_f \frac{k_R M_{x0}}{R_y h_0} l + 2\rho\psi_{p\omega} t \omega h_0 l, \quad (10)$$

де коефіцієнт враховує частку полиць  $c_f = M_{xf}/M_x$  в сприйнятті зусилля  $M_x$ , а її мінімум отримуємо з рівняння рівності нулю першої похідної відомої формулу з урахуванням

параметрів  $k_{q1}$  і  $k_R$ :  $k_{q1} = \sqrt{\frac{\psi_{pf}}{\psi_{p\omega}(h_0 t \omega / (3A_f) + 1)}}$  і  $k_{q2} = \sqrt[3]{k_{q1}^2}$ .

$$h_0 = k_{q1} \sqrt{k_R W_{x0} / t_\omega}, \quad h_0 = \sqrt[3]{k_{q1}^2 \sqrt[3]{k_R W_{x0} \lambda_\omega}}. \quad (11)$$

У рівнянні (11) гнучкість стінки  $\lambda_\omega = \frac{h_0}{t_\omega}$ . Обчислені значення коефіцієнтів  $k_{q1}$  при  $\psi_p = 1,05$ ;  $\Psi_{p\omega} = 1,1$  вказують на істотний вплив співвідношень площі стінок та площі полиць на оптимальні параметри балок.

В балках жорсткості мостових пролітних будов, на відмінність від будівель, в поперечному перерізі в зоні максимального згинального моменту можуть виникати також значні за величиною поперечні сили (точки підвісу балки жорсткості до арки), а також, зважаючи на рухомий характер навантаження та дискретність точок підвісу балки необхідно враховувати і вплив локальних напружень.

Виходячи з того, що згідно з умовою пластичності Губера-Мізеса-Генки вираз  $\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \leq R_y$  для інтенсивності напружень для плоского напруженого стану при чистому зсуві ( $\sigma_x = \sigma_y = 0$ ) дає значення максимальних дотичних напру-

жень  $\tau_{xy} \leq \frac{R_y}{\sqrt{3}}$ , а також з врахуванням того, що для шарнірно обпертої балки при одночасній дії в перерізі максимальних нормальних та дотичних напружень слід приймати  $\tau_{xy} = 0,5R_s$ , приймають:  $\sigma_x \leq \sqrt{0,75}R_y \rightarrow \frac{\sigma_x}{R_y} = \frac{\sqrt{3}}{2}$ . Це, в свою чергу, означає, що

$\sigma_x \leq \sqrt{0,75}R_y \rightarrow \frac{\sigma_x}{R_y} = \frac{\sqrt{3}}{2}$ , тобто при максимальних дотичних напруженнях  $\tau_{xy} = \frac{0,5R_y}{\sqrt{3}}$  ко-

ефіцієнт  $k_{R\tau} = \frac{R_y}{\sigma_x}$  дорівнює  $1/0,866 = 1,154$ , а врахування додаткових дотичних напружень збільшує раціональну висоту балки.

При сумісному врахуванні додаткових дотичних та локальних напружень умова міцності набуває виду із введенням коефіцієнта  $k_{\tau s} = \sqrt{3}\tau_{xy} / R_y = \tau_{xy} / R_s$  та  $k_{loc}$ .

$$\frac{\sigma_x}{R_y} = \left[ \pm \frac{k_{lok}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{k_{lok}}{2}\right)^2 + (1 - k_{\tau s}^2 - k_{lok}^2)} \right]. \quad (12)$$

Для визначення оптимальних параметрів коробчастої балки вводиться таке співвідношення розрахункових коефіцієнтів:

$$k_s = \frac{1}{k_{\tau s}}; \quad k_{R\tau} = \frac{R_y}{\sigma_x} = \frac{2}{\left[ \pm k_{lok} \pm \sqrt{(k_{lok})^2 + 4(1 - k_{\tau s}^2 - k_{lok}^2)} \right]}. \quad (13)$$

Врахування локальних та дотичних напружень разом з нормальними зсуває перерозподіл сталі між полицями та стінками, а значення оптимальної (раціональної ваги) висоти балки набуває виду відомого вигляду з урахуванням параметра  $k_{R\tau}$ :

$$h_0 = \sqrt[3]{k_{q1}^2 \sqrt[3]{k_{R\tau} W_{x0} \lambda_\omega}}. \quad (14)$$

Поздовжні розтягувальні сили (в балках жорсткості комбінованої системи) в складному напружено деформованому стані враховуються рівнянням:

$$\sigma = \pm \frac{M_x}{W_x} \pm \frac{M_y}{W_y} + \frac{N}{A} \leq R_y \gamma_c, \quad \text{або} \quad \frac{M_x}{R_y W_x} \left( 1 + \frac{\sigma_{zM_y}}{\sigma_{zM_x}} + \frac{\sigma_{zN}}{\sigma_{zM_x}} \right) \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n}. \quad (15)$$

Після заміни площі перерізу через значення моменту опору та площі стінки

$$A_f = \frac{W_x}{h_0} - 2 \frac{h_0^2 t_\omega}{h_0 b} \rightarrow A_f = \frac{W_x}{h_0} - \frac{h_0 t_\omega}{3}. \quad (16)$$

Отримано такий вираз для цільової функції:

$$\frac{m_{bC}}{\rho l} = 2 \psi_{pf} \left( \frac{W_x}{h_0} - \frac{h_0 t_\omega}{3} \right) + 2 \rho \psi_{p\omega} t_\omega h_0 \rightarrow \min \quad (17)$$

Позначивши через  $W_{xD} = \frac{M_x}{R_y}$  момент опору перерізу при дії тільки згинального

моменту в площині найбільшого навантаження остаточною формулою моменту опору перерізу в складному напружено-деформованому стані матиме вигляд після підстановки в умову міцності:

$$W_x = \frac{\gamma_n W_{xD}}{\gamma_c} \left( 1 + \frac{\sigma_{zM_y}}{\sigma_{zM_x}} + \frac{\sigma_{zN}}{\sigma_{zM_x}} \right). \quad W_x = \frac{\gamma_n}{\gamma_c} k_{RN} W_{xD}, \quad k_{RN} = \left( 1 + \frac{\sigma_{zM_y}}{\sigma_{zM_x}} + \frac{\sigma_{zN}}{\sigma_{zM_x}} \right). \quad (18)$$

Умова  $\left( \frac{m_{bC}}{\rho l} \right)' = 0$  дозволяє знайти оптимальну висоту перерізу, що мінімізує значення цільової функції з параметром  $k_{RN}$ :

$$h_0 = k_{qN1} \sqrt[3]{\frac{\gamma_n k_{RN} W_{xD}}{\gamma_c t_\omega}}. \quad (19)$$

а також аналогічний вираз через гнучкість стінки:

$$h_0 = \sqrt[3]{k_{qN1}^2} \sqrt[3]{\frac{\gamma_n k_{RN} W_{xD} \lambda_\omega}{\gamma_c}} \cdot k_{RN} = \left( 1 + \frac{\sigma_{zM_y}}{\sigma_{zM_x}} + \frac{\sigma_{zN}}{\sigma_{zM_x}} \right). \quad (20)$$

Таким чином, отримано формулу для визначення раціональної (обмежено оптимальної) висоти балки коробчастого перерізу при складному напружено-деформованому стані. З урахування всіх його нових компонентів ( $k_{RN}$ ,  $k_{R\tau}$ ) і напружено-деформованого стану:

$$h_0 = k_{qN1} \sqrt[3]{\frac{k_{R\tau} k_{RN} W_{xD}}{t_\omega}}, \quad \text{або} \quad h_0 = \sqrt[3]{k_{qN1}^2} \sqrt[3]{k_{R\tau} k_{RN} W_{xD} \lambda_\omega}. \quad (21)$$

Доведено, що до збільшення раціональної висоти сталеві балки призводить до підвищення класу відповідальності конструкцій та врахуванню поздовжніх та поперечних сил.

Отримані результати верифіковані та застосовані при числових дослідженнях комбінованої системи пролітної будови моста і приведені в розділах 4 та 5.

**В четвертому розділі** наведено результати проведених чисельних досліджень напружено-деформованого стану сталевих аркових мостів комбінованої системи з застосування суцільностінчастих перерізів трубчатого та складеного коробчастого про-

філів з використанням програмного комплексу ETABS-2015, який виконує розрахунок мостів з врахуванням всіх стандартних навантажень, має графічний 3D процесор та інтерактивний ввід даних для розрахунку моделі (рис.5).

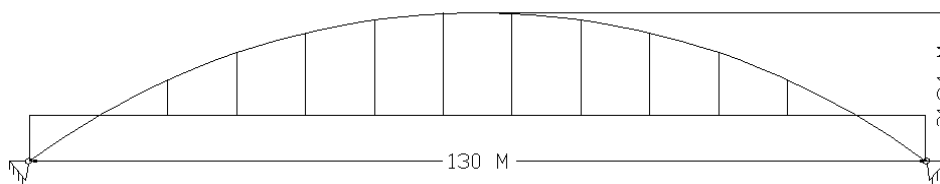


Рис. 5. Загальна схема сталевого аркового мосту комбінованої системи

Виконано порівняння конструктивних рішень аркових мостових переходів, а саме двох типів сталевих арок (рис.6) при однакових конструкціях проїжджої частини (рис.5). Чисельні дослідження проведені із застосуванням ліцензованого американського програмного комплексу ETABS-2015. Конструктивні рішення комбінованої аркової конструкції, які порівнювалися, відрізняються проектними перерізами арок: в першому варіанті конструкція арки прийнята з труби діаметром 80 in (2032 мм) завтовшки 1 in (25 мм), а в другому варіанті арка прийнята коробчастого прямокутного перерізу висотою 50 in (1270 мм) і шириною 70 in (1778 мм), товщина полиць 1,25 in (32 мм), товщина стінки 0,8 in (20 мм) (див. рис.6).

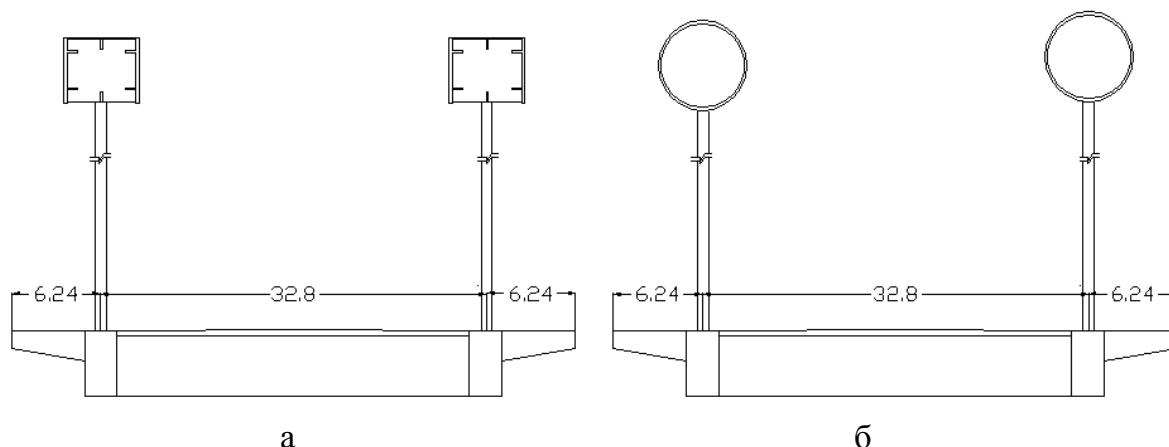


Рис. 6. Поперечні перерізи двох типів мостів з суцільностінчастими арками: арка складеного коробчастого перерізу (а); арка трубчастого перерізу (б), розміри вказані у футах (1 фут = 0.3048 м)

Впливи і навантаження, як вхідні дані для розрахунку, прийнято для умов Іраку: найнижча температура в січні  $-2^{\circ}\text{C}$ , максимальна температура металу на сонячній стороні  $+80^{\circ}\text{C}$ , переважний напрямок вітру NW–SE, максимальна швидкість вітру 44,4 м/с (усереднення за 3 секунди), річний рівень опадів 170 мм, як матеріал несучих сталевих конструкцій (за виключенням вант) прийнято сталь за A992 з розрахунковим опором за межею текучості  $f_y = 50 \text{ ksi}$  ( $R_y = 345 \text{ МПа}$ ), що відрізняється, крім високої міцності, стійкістю до корозії та є аналогом сталі 10ХСНД. Навантаження 10 т на погонний метр з урахуванням власної ваги. Розрахункова температура нагрівання сталевих конструкцій від температури монтажу до температури експлуатації  $t^{\circ} = 60^{\circ}\text{C}$ . Розглянуті навантаження різного типу у відповідності до американських норм проектування AASHTO LRFD (рис. 7).

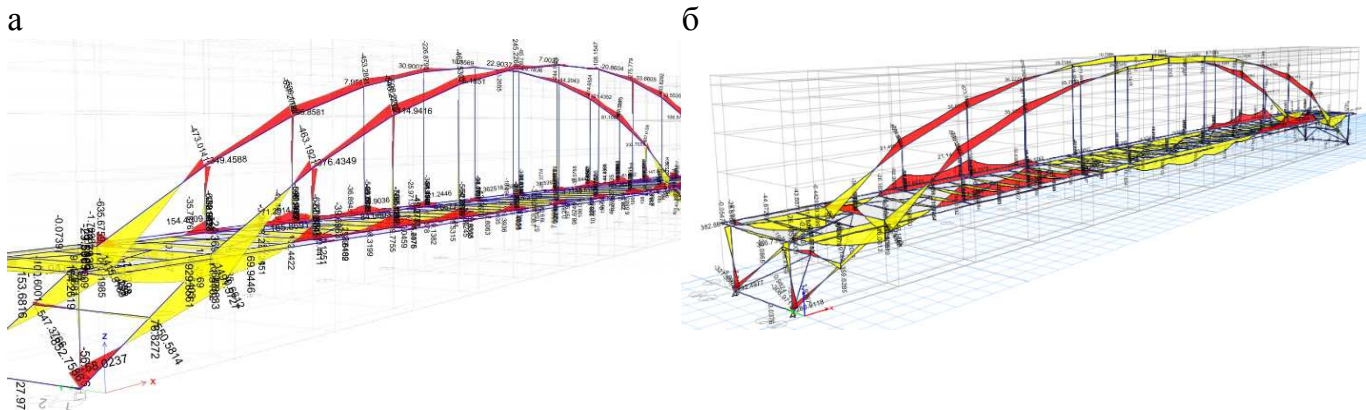


Рис. 7. Результати розрахунку по програмі ETABS-2015 комбінованої конструкції пролітної будови з фіксованими опорами: з трубчастою аркою (а) та коробчастого перерізу (б)

Порівняння варіантів прийнято за умови однакових геометричних розмірів двох варіантів комбінованих арокних систем. Для дотримання подібності варіантів передбачена умова однаковості площ поперечних перерізів трубчастого і коробчастого перетину арок, балка проїзної частини прийнята однаковою для обох варіантів. Розрахункова схема аркової комбінованої конструкції в обох варіантах прийнята також однаковою: двошарнірна система з нерухомими шарнірними опорами. Результати числових досліджень двох варіантів мостів показали, що арки з труб є більш ефективними і надійними конструкціями з позицій напружено-деформованого стану та динамічних характеристик конструкції в цілому (рис.7).

Так в арокній конструкції з труб отримано зниження вертикальних переміщень арокних елементів мостів при симетричному навантаженні, а при несиметричному навантаженні різниця між двома типами мостів незначна. Цей ефект досягнуто завдяки тому, що жорсткість балок проїзної частини грає істотний вплив на загальну деформативність арокної частини мосту за несиметричного навантаження. Це можна пояснити тим, що максимальні переміщення при несиметричному навантаженні виникають не по центру арки, а в третині прольоту.

Для загального аналізу конструкцій комбінованих систем аркового типу запропоновано характеризувати їх параметром проектування: відношення згинальних моментів в арці та балці при симетричному навантаженні  $\varphi_{Tsym}$ ;  $\varphi_{Rsym}$  і для несиметричного навантаження максимальних згинальних моментів арки  $\varphi_{Runsym}$  та балки  $\varphi_{Tunsym}$ :

$$\varphi_{Tsym} = \frac{\sum_T (M_1 + M_2)}{\sum_R (M_1 + M_2)} = \frac{1294 + 1313,31}{1046,8 + 1071,59} = 1,23, ; \varphi_{Rsym} = \frac{1046,8 - 1071,59}{1294 + 1313,31} = 0,812$$

$$\varphi_{Tunsym} = \frac{7564 + 7568}{7542,7 + 5239} = 1,43; \varphi_{Runsym} = \frac{\sum_R (M_1 + M_2)}{\sum_T (M_1 + M_2)} = \frac{5342,7 + 5239}{7564 + 7568} = 0,69$$

Встановлені та розраховані середні значення коефіцієнтів відношення згинальних моментів на балку та на арку комбінованої системи, які склали 1,23 – для симетричного навантаження, та 1,43 – для несиметричного навантаження.

**В п'ятому розділі** проведені числові дослідження раціональних конструкцій сталевих арокних мостових конструкцій з метою визначення впливу умов опираючого



арки на фундаменти та загальної схеми конструкції на загальні витрати сталі для умов Іраку.

Задача в даному разі формулюється так: вибрати конструктивну схему арочного моста комбінованого типу з метою зменшення навантажень на фундаменти.

Виконано числові дослідження аркових сталевих мостових конструкцій на прикладі арочної системи прольотом 130 м. Чисельні дослідження розглянутих конструкцій виконані за допомогою програмного комплексу ETABS-2015 та CSI bridge -2014.

Виконано порівняння 3 варіантів розрахункових схем аркових конструкцій мостових переходів, щонайбільш застосованих в умовах Іраку (рис.8).

У конструктивному вирішенні прийнято, що конструкцію гнучких арок виконують зварного коробчастого перерізу, а балку жорсткості також проектують як зварну коробчасту балку.

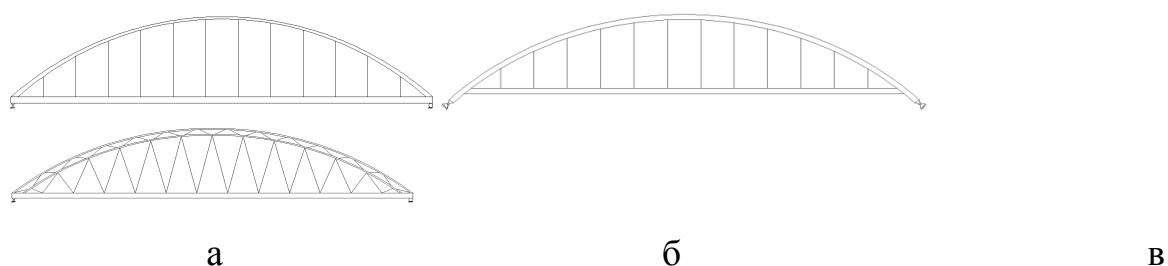


Рис. 9. Конструктивні схеми варіантів сталевих аркових пролітних будов на проліт 130 м (4251б): а – балкова безрозпінна арка з затяжкою; б – двошарнірна арка; в – аркова ферма

Для всіх варіантів конструкції, для яких проведені дослідження напружено-деформованого стану, прийнято корисне навантаження з урахуванням власної ваги конструкції близько  $930 \text{ кгс/м}^2$ .

Перший варіант (рис.8,а) – це двошарнірна аркова конструкція, що складається з двох арок, кожна з яких має одну шарнірно-нерухому опору, а іншу шарнірно-рухому. Функцію затяжки арки виконують головні балки проїзної частини мостового переходу. Як балка проїзної частини, так і арки, виконані зі сталевих зварних коробчастих профілів. Таке конструктивне рішення більш рухливе, але вплив температурних впливів нівелюється завдяки рухомій опорі, що важливо в умовах значного перепаду температур в Іраку.

Другий варіант (рис.8,б) – це двошарнірна аркова конструкція, що складається з двох арок, кожна з яких має дві опори шарнірно нерухомі. Головні балки проїзної частини та арки виконані зі сталевих зварних коробчастих профілів, які служать затяжкою. Таке конструктивне рішення більш жорстке, але вплив температурних впливів проявляється більше.

Третій варіант (рис.8,в) – це сталева конструкція, в якій основними несучими елементами є дві шарнірно розташовані ферми арочного обрису. Нижній пояс ферм утворений головними балками проїзної частини. Ферма також має при установці на опорні частини мостового переходу одну шарнірно-нерухому опору, та другу шарнірно-рухому. Опори проїзної частини шарнірно-нерухомі. Балка проїзної частини та основні стиснуті елементи ферми виконані із сталевих зварних коробчастих профілів.


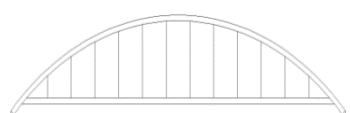
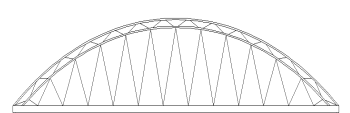
Виконано числові дослідження напружено-деформованого стану сталевих аркових мостових конструкцій для прольоту 130 м при однаковому рівномірно розподіленому навантаженні 2,18 т на 1 м<sup>2</sup> з урахуванням власної ваги і коефіцієнта динамічності для рухомого навантаження  $K_{Dynam}=1,15$  та  $I_{impact}=14.8\%$ .

При порівнянні конструктивних рішень пролітних будов за обраними варіантами була використана запропонована та досліджена методика визначення оптимальної висоти перерізу балки та арки, що дало можливість розглядати варіанти, кожен з яких є раціональним (розділ 3).

Розрахунки показали, що деформування арочної ферми комбінованої конструкції моста при несиметричному навантаженні істотно відрізняється від деформування перших двох варіантів комбінованих мостів. Розглянуто застосування сталі St52 и St60 (DIN) за стандартом ASTM A992 США та показана їй відповідність сталям С345, С355 та С420 відповідно до ДБН В.2.6:198-2014. Результати обчислень зведені в табл. 2.

Таблиця 2

**Результати розрахунку аркових комбінованих конструкцій пролітних будов**

Тип аркової сталеві конструкції пролітної будови	Елемент конструкції	Умовна теоретична маса (т)		Переміщення (in)
		елементів	загальна	
 Балкова безрозпирна арка з затяжкою	Арка	138.9	282,93	-9.4"
	Балка жорсткості	126.15		
	В'язі	17.42		
 Двошарнірна арка	Арка	176.6	284.27	-9.6"
	Балка жорсткості	90.25		
	В'язі	17.42		
 Аркова ферма	Арка	96	268.5	-2.6"
	Балка жорсткості	85		
	В'язі та діагональні елементи	57.3 + 30.2		

За табл. 2, з позицій деформативності, перші два варіанти практично не відрізняються один від одного.

Виконано порівняння питомої ваги конструктивних елементів пролітних будов для трьох варіантів (табл. 3).

### Порівняння питомої ваги конструктивних елементів аркових пролітних будов для трьох варіантів

Варіант		Відносні % від загальної теоретичної маси		
		арка	балка жорсткості	в'язі
1	Аркова пролітна будова з шарнірною рухомою опорою (балкова безрозпірна арка з затяжкою)	49	44	7
2	Арковий міст с двома нерухомими (фіксованими) опорами	62	33	5
3	Аркова мостова ферма комбінованої конструкції	36	31	33

Аналіз питомої ваги окремих конструктивних елементів показав, що в балкових безрозпірних системах, де балка жорсткості виконує функцію затяжки, витрати сталі на арку склали (49)%, а в арковій розпірній системі (варіант 2) 62%. У той же самий час питома вага конструкції балки і в'язей в першому варіанті складає близько 50%, а в розпірній системі 38%. Запропоновано параметр (проектний фактор)  $\beta_G$  для оцінки технічного рішення комбінованих аровних сталевих мостів. Цей параметр є відношенням ваги конструкцій моста (однієї арки, однієї балки і в'язей на одну арку і балку) до загального рухомого навантаження, яке в прикладі розрахунку склало на 1 арку 650 тс.

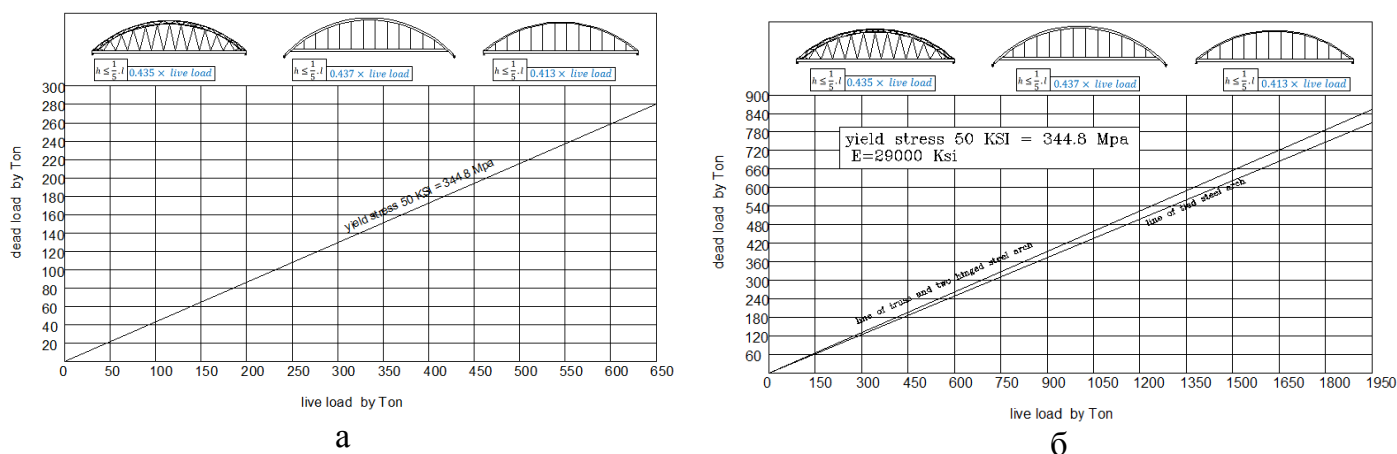


Рис. 13. Залежність ваги сталевих конструкцій балки та арки з урахуванням в'язей (dead load) від сумарного корисного навантаження (live load):  
а – навантаження до 650 тс; б – навантаження від 650 до 1950 тс

Розраховано параметр  $\beta_G$  для кожного варіанту конструкцій аркового моста:

$$\beta_{Gj} = \frac{\text{умовна теоретична вага конструкцій} \sum m_i}{\text{розрахункове рухоме навантаження}}$$

$$\beta_{G1} = 282,93/650=0,435; \beta_{G2} = 284,27/650=0,437; \beta_{G3} = 268,5/650=0,413.$$

Отримані результати дозволяють спрогнозувати масу сталевих конструкцій пролітної будови моста залежно від сумарного корисного навантаження (рис. 13).

Запропоновано графік, на якому показані техніко-економічні параметри розглянутих варіантів сталевих пролітних будов аркових мостів (рис. 14).

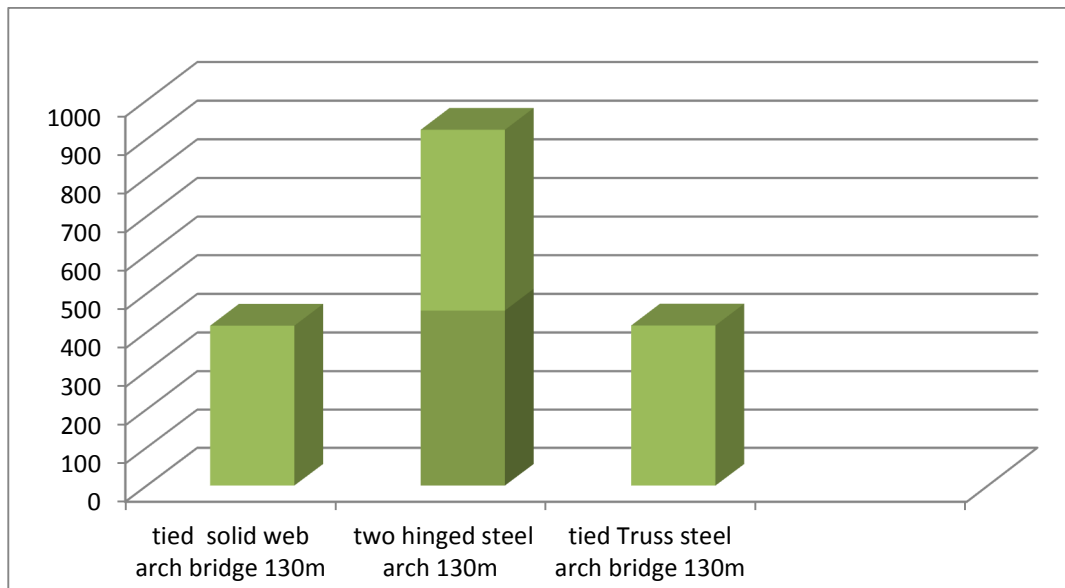


Рис. 14. Порівняння варіантів сталевих конструкцій пролітних будов мостів за вартістю з врахуванням витрат на фундаменти

Виконано розрахунок вартості 1 тони комбінованих конструкцій мостів для різних конструктивних рішень опор сталевому мосту. Таким чином, залежно від умов обпирання на фундаменти при нерухомих опорах (температурні впливи значні для умов Іраку) спричиняють додаткові зусилля, що також передаються на фундаменти.

У **висновках** підсумовано основні результати роботи і окреслено їх наукове та практичне значення.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ І ВИСНОВКИ

В роботі отримані наступні результати:

1. Узагальнено та удосконалено методіку визначення оптимальної висоти перерізу сталевих елементів коробчастого профілю за сумісної дії згинального моменту, поздовжньої та поперечної сил для сталевих аркових комбінованих конструкцій мостових пролітних будов. Ці дослідження визначили діапазон коефіцієнтів, які слід призначати при обчисленні оптимальної висоти балки коробчастого перерізу. Для балок жорсткості  $k_R=1,2..1,3$ ,  $k_{RN}=1,1..1,2$ ,  $\gamma_n=1,25$ . Для арочної частини моста значення коефіцієнтів слід призначати в діапазоні:  $k_R=1,1..1,3$ ,  $k_{RN}=1,4..1,6$ ,  $\gamma_n=1,25$ .

2. Удосконалено аналітичний підхід перевірки стійкості аркових сталевих комбінованих конструкцій пролітних будов мостів за деформованою схемою на основі числових досліджень. Результати досліджень показали хороше наближення до результатів розрахунків і перевірки стійкості аркових мостових пролітних будов на симетричне та несиметричне навантаження за нормативними вимогами інших країн.

3. Вперше визначено діапазон граничної гнучкості пружних арок комбінованих систем мостів при перевірці стійкості залежно від відношення нормальних напружень від поздовжніх сил та згинальних моментів.

4. На основі числових досліджень отримано важливий науково-технічний результат про те, що арки з труб є більш ефективними і надійними конструкціями з позицій напружено-деформованого стану та динамічних характеристик конструкції в цілому, але з позицій вартості виготовлення в умовах Іраку ефективними є аркові комбіновані системи із елементів коробчастого перерізу.

5. Встановлено і розраховано середній коефіцієнт співвідношення згинальних моментів на балку і арку комбінованої конструкції, який склав для симетричного навантаження – 1,23, а для несиметричного навантаження – 1,43.

6. Розроблена методика розрахунку аркових комбінованих конструкцій мостів із застосуванням фактору ваги як відношення умовної теоретичної ваги конструкцій до величини корисного навантаження. Встановлена питома вага окремих конструктивних елементів для кожного типу аркової комбінованої сталеві конструкції. Для безрозпірних систем витрати сталі на арку складають близько 49%, а на балку жорсткості відповідно 44%. Для розпірних конструкцій аркового типу витрати сталі на арку складають 62%, а на балку жорсткості 33%. Аркові тросові ферми мають аналогічні показники 36% та 31%.

7. На основі числових досліджень отримано параметр (фактор) ваги  $\beta G$  сталевих конструкцій аркового моста для трьох типів (варіантів) сталевих комбінованих арок мостів. Фактор ваги моста  $\beta G$  прийнятий як співвідношення між умовною теоретичною вагою моста і рухомим навантаженням. Встановлено діапазон зміни фактору, що складає  $\beta G=(0,437\dots0,413)$ . Отримані результати дозволяють спрогнозувати масу сталевих конструкцій пролітної будови моста залежно від сумарного корисного навантаження. Числові дослідження трьох варіантів комбінованих конструкцій аркових мостових пролітних будов показали, що особливий вплив на ефективність конструкції моста має вартість конструкції опор.

8. Результати роботи дозволяють на початкових стадіях проектування пролітних будов середніх комбінованих аркових мостів науково обґрунтовано обирати тип конструктивного рішення, з урахуванням мінімізації витрат сталі і забезпеченням міцності та загальної стійкості призначити параметри поперечного перерізу арки та балки жорсткості, а також орієнтовно визначити теоретичні витрати сталі.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Билык С. И. Методики проверки устойчивости и прочности арок моста из стальных труб с учетом требований европейских и отечественных норм / С. И. Билык, Н. Альтае, А. Аббас // Містобудування та територіальне планування : наук.-техн. зб. / відп. ред. М. М. Осетрін. – К. : КНУБА, 2016. – Вип. 60. – С. 6–14.

*Фахове видання. Внесок здобувача: Проведено числові дослідження стійкості арок мостів з урахуванням вимог європейських та американських норм.*

2. Bilyk S. I. Fabrication of Plate Girders and Cover-Plate Beams / S. I. Bilyk, Natheer Aied Athaab Al-Taie, Adil Jabbar Abbas // Науковий вісник будівництва : наук. зб. – Харків : ХНУБА, 2016. – Вип. (3) 85. – С. 87–92.

*Внесок здобувача: Узагальнено особливості виготовлення зварних сталевих балок мостів коробчастого і двотаврового перерізу.*

3. Bilyk S. I. Field Welding of Steel Girders for Bridges / S. I. Bilyk, Natheer Aied Athaab Al-Taie, Adil Jabbar Abbas // Будівельні вироби та матеріали : всеукр. наук.-техн. та виробн. журн. – К. : НДІБМВ, 2016. – Вип. (2–3) 92. – С. 72–74.

**Фахове видання.** *Внесок здобувача: Узагальнено конструктивні особливості зварних сталевих балок мостів.*

4. Bilyk S. I. Temperatures affected on two hinged steel arch bridge [Електронний ресурс] / S. I. Bilyk, Natheer Aied Athaab Al-Taie, Adil Jabbar Abbas // International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT). – July 2016. – Vol. 5, Issue 4. – P. 21–29. – Режим доступу :

[http://www.ijesit.com/Volume%205/Issue%204/IJESIT201604\\_04.pdf](http://www.ijesit.com/Volume%205/Issue%204/IJESIT201604_04.pdf).

**Іноземне видання, входить до міжнародних наукометричних баз.** *Досліджено напружено-деформований стан коробчастих балок сталевих мостів з урахуванням температурних ефектів.*

5. Білик С. І. Конструктивні коефіцієнти та раціональна висота сталевіої коробчатої балки постійного перерізу / С. І. Білик, Н. Альтайе, Л. І. Лавріненко // Будівельне виробництво : наук. зб. – К. : ДП «НДІБВ», 2017. – Вип. № 62/1. – С. 31–35.

**Фахове видання.** *Внесок здобувача: Виконано узагальнені теоретичні дослідження з визначення конструктивних коефіцієнти раціональної висоти сталевіої коробчатої балки постійного перерізу з урахуванням складного напружено-деформованого стану.*

6. Bilyk S. I. Study about bridge plate girders with variable depth / Bilyk S. I., Natheer Aied Athaab Al-Taie, Adil Jabbar Abbas // Наука та будівництво : наук. зб. – 2016. – Вип. 2 (8). – С. 32–36.

**Фахове видання.** *Внесок здобувача: Виконано теоретичні напружено-деформованого стану опорних вузлів сталевих зварних мостів з метою визначення приведених напружень.*

7. Bilyk S. I. Study about welded steel arch bridges for three types, Calculations the dead load of steel structures for welded steel arch bridges by use value of live load. (Дослідження зварних сталевих аркових мостів трьох типів, визначення постійного навантаження від власної ваги сталевих зварних конструкцій аркових мостів через рухоме навантаження) / S. I. Bilyk, Natheer Aied Athaab Al-Taie // Містобудування та територіальне планування : наук.-техн. зб. / відп. ред. М. М. Осетрін. – К. : КНУБА, 2017. – Вип. 65 – С. 100–115.

**Фахове видання.** *Внесок здобувача: Виконано числові та дослідження варіантів зварних сталевих аркових мостів трьох типів, і встановлено закономірності взаємозв'язку між значеннями рухомого навантаження і власною вагою типу конструкцій мостів.*

## АНОТАЦІЯ

**Альтайе Натхір Айєд Атхааб. Раціональна комбінована конструкція зварного сталевого аркового мосту для умов Іраку.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, 2017.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню аркових елементів в складі комбінованих конструкцій мостового типу за дії специфічних навантажень та їх порівняльній ефективності. Запропонована методика розрахунку аркових комбінованих конструкцій мостів із застосуванням фактору ваги як відношення умовної теоретичної ваги конструкцій до величини корисного навантаження.

Розроблено методику і чисельно досліджено загальні принципи компонування коробчастих перерізів арок оптимальної висоти, які б забезпечували мінімальні витрати сталі; досліджено варіанти комбінованих конструкцій аркових мостів, встановлено питому вагу окремих конструктивних елементів, розрахункові коефіцієнти для розрахунку арок на початкових стадіях проектування. Отримані результати дозволяють прогнозувати масу сталевих конструкцій проїзної частини моста залежно від сумарного корисного навантаження.

Достовірність нових аналітичних результатів і висновків обґрунтована застосуванням при дослідженні загально прийнятих методів класичної механіки, використанням базових положень та рівнянь розрахунку стержньових та тонкостінних елементів на міцність і стійкість, а також відповідністю отриманих результатів результатам числових досліджень та тестових задач.

**Ключові слова:** пролітні будови мостів, арки, суцільностінчаті перерізи, міцність, стійкість, напружено-деформований стан, оптимальна висота перерізу, аналітична та числова моделі, показники економічної ефективності.

## ABSTRACT

**Natheer Aied Athaab Al-Taie. A rational combined structure of the welded steel arch bridge for Iraqi conditions.** – Qualifying scientific work presented as manuscript.

Thesis for a candidate of technical sciences degree in specialty 05.23.01 – «Buildings structures, buildings and constructions». – Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv 2017.

This thesis is a study of arch elements being component of composite bridge constructions, taking into account specific loads and their comparative efficacy. The methodology of using weight as the relation of relative theoretical weight to the work load value in the composite bridge constructions is suggested.

The Introduction describes the general scientific problem, rationale of the research, also its relation to the scientific plans and topics. Purposes and tasks of the thesis have been determined, academic novelty and practical value of the results achieved have been substantiated.

The first Chapter is dedicated to the analysis of history and present-day condition of arch spans, also the theory of flexible beams calculation and application of the welded solid elements in the arch constructions.

The second Chapter addresses the problem of arch strength in the composite bridge constructions. The arch is considered as being flexible within the limits of 100...140 of plane of loads. The load type and character, symmetric and antisymmetric deformations inflicted by the strength loss, also initial structural defects and eccentricities of force have been examined. The analytical decisions for checking arch stability taking into account its deformations have been specified and compared with the provisions of AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (USA).

The third Chapter describes the mathematical and physical model of box steel arch in order to determine its optimal depth. The restricted optimal decision has been studied, the formulas for determination of the rational arch depth at the early design stages of design have been provided (taking into consideration bending moments, shear forces and local stresses). Verification of the results achieved is given in the Chapters below.

The fourth Chapter contains the results of the numerical investigations (conducted with the use of ETABS -2015 software) of stress strain behavior of the steel arch bridges that have tubular and complex solid wall sections.

The fifth Chapter provides the method and results of the study of rational construction of steel arch bridges aimed at determining the influence of arch support and its general construction on the steel spread in Iraqi conditions. The numerical investigations of the steel arch bridge construction (illustrated by the example of 130 m height girder) have been carried out with the use of ETABS-2015 and CSI bridge-2014 software.

The results achieved, as well as their scientific and practical meaning are provided in conclusions.

**Key words:** bridge floors, arches, wall girders, strength, resistance, stress stain behavior, optimal height of girder, analytical and numerical models, cost effectiveness indicators.



---

Підписано до друку 16.03.2018 р. Формат 60x90/16.  
Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 0,9.  
Тираж 100. Зам. 23.

---

«Видавництво “Науковий світ”»<sup>®</sup>  
Свідоцтво ДК № 249 від 16.11.2000 р.  
м. Київ, вул. Казимира Малевича (Боженка), 23, оф. 414.  
200-87-15, 050-525-88-77  
E-mail: [nsvit23@ukr.net](mailto:nsvit23@ukr.net)  
Сайт: [nsvit.cc.ua](http://nsvit.cc.ua)