

ISSN 2618-0650 (Print)
ISSN 2664-1364 (Online)

Механіка



та математичні методи

**Mechanics
and Mathematical Methods**

**Науковий журнал
The scientific journal**

VI/1/2024

УДК 531 : 51-7 (05)
М55

МЕХАНІКА ТА МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ

Науковий журнал



Засновник і видавець:

Одеська державна академія будівництва та архітектури

**Том VI
№1
2024**

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації: Серія КВ №23478–13318 Р від 13.07.2018 р.

Рішення Національної ради №1162 від 26.10.2023 р.,
протокол №24; ідентифікатор медіа: R30-01810

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
Серія ДК №4515 від 01.04.2013 р.

М55 **Механіка та математичні методи** : науковий журнал. — Одеса : ОДАБА, 2024. —
Том VI. — №1. — 142 с.

В науковому журналі публікуються статті і огляди за спеціальностями:

- 111 Математика;
- 112 Статистика;
- 113 Прикладна математика;
- 121 Інженерія програмного забезпечення;
- 122 Комп'ютерні науки та інформаційні технології;
- 124 Системний аналіз;
- 131 Прикладна механіка;
- 192 Будівництво та цивільна інженерія.

Рекомендовано до друку Вченою радою Одеської державної академії будівництва та архітектури, протокол №6 від 29.02.2024 р.

Адреса: редакція журналу «Механіка та математичні методи»
Одеська державна академія будівництва та архітектури
вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, Україна, 65029

Телефони: (048)7234937, (048)7323402, (048)7298563

E-mail: mmm@odaba.edu.ua

Web: mmm-journal.com.ua

УДК 531 : 51-7 (05)
М55

ISSN 2618-0650 (Print)
ISSN 2664-1364 (Online)

Одеська державна академія
будівництва та архітектури, 2024

Редакційна колегія:

Головний редактор: Ковров А. В., к.т.н., проф., ректор Одеської державної академії будівництва та архітектури, Одеса, Україна;

Заступники головного редактора:

Крутий Ю. С., д.т.н., проф., професор кафедри інформаційних технологій та прикладної математики Одеської державної академії будівництва та архітектури, Одеса, Україна;

Сур'янінов М. Г., д.т.н., проф., завідувач кафедри будівельної механіки Одеської державної академії будівництва та архітектури, Одеса, Україна;

Відповідальний секретар: Кіосак В. А., д.ф.-м.н., проф., професор кафедри вищої математики Одеської державної академії будівництва та архітектури, Одеса, Україна;

- Бербюк В. Є., д.ф.-м.н., проф., професор кафедри механіки та морських наук, Технічний університет Чалмерса, Гетеборг, Швеція;
- Ватуля Г. Л., д.т.н., проф., професор кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту, Харків, Україна;
- Горик О. В., д.т.н., проф., завідувач кафедри загальнотехнічних дисциплін Полтавської державної аграрної академії, Полтава, Україна;
- Куріазопоулос А., к.т.н., доц., професор кафедри будівництва, Університет Західної Аттики, Афіни, Греція;
- Кода Е., д.т.н., проф., декан факультету будівництва та інженерії середовища Варшавського природничого університету, Варшава, Польща;
- Кононов Ю. М., д.ф.-м.н., проф., завідувач відділу теорії керуючих систем інституту прикладної математики та механіки НАН України, Слав'янск, Україна;
- Круглов В. Є., д.ф.-м.н., проф., професор кафедри методів математичної фізики Одеського національного університету імені І. І. Мечникова, Одеса, Україна;
- Кучер М. К., д.т.н., проф., завідувач відділу конструкційних матеріалів інституту проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна;
- Лазарева Д. В., к.т.н., доц., завідувачка кафедри інформаційних технологій та прикладної математики Одеської державної академії будівництва та архітектури, Одеса, Україна;
- Лесечко О. В., к.ф.-м.н., доц., завідувач кафедри вищої математики Одеської державної академії будівництва та архітектури, Одеса, Україна;
- Лещенко Д. Д., д.ф.-м.н., проф., завідувач кафедри теоретичної механіки Одеської державної академії будівництва та архітектури, Одеса, Україна;
- Ляшенко Т. В., д.т.н., проф., професорка кафедри інформаційних технологій та прикладної математики Одеської державної академії будівництва та архітектури, Одеса, Україна;
- Максимович О. В., д.т.н., проф., професорка кафедри зварювального виробництва, діагностики та відновлення металоконструкцій Національного університету "Львівська політехніка", Львів, Україна;
- Отрош Ю. А. д.т.н., проф., начальник кафедри пожежної профілактики в населених пунктах Національного університету цивільного захисту України, Харків, Україна;
- Пастернак Я. М., д.ф.-м.н., проф., завідувач кафедри прикладної математики та механіки Луцького національного технічного університету, Луцьк, Україна;
- Пневматікос Н., к.т.н., доц., доцент кафедри будівництва, Університет Західної Аттики, Афіни, Греція;
- Савченко О. Г., д.ф.-м.н., проф., професор кафедри алгебри, геометрії та математичного аналізу Херсонського державного університету, Херсон, Україна;
- Трач В. М., д.т.н., проф., завідувач кафедри мостів і тунелів, опору матеріалів і будівельної механіки Національного університету водного господарства та природокористування, Рівне, Україна;
- Шваб'юк В. І., д.т.н., проф., професор кафедри прикладної математики та механіки Луцького національного технічного університету, Луцьк, Україна.

Технічний редактор: Теорло Наталя Анатоліївна, аспірантка

Лінгвістичний радник з англійської мови: Мар'яно Яніна Георгіївна, к.ф.н, доц.,
завідувачка кафедри іноземних мов

The composition of the editorial board:

Chief Editor: Kovrov A., Ph.D., Professor, Rector of Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine;

Deputy Chief Editor:

Krutii Yu., Doctor of Technical Science, Professor, Professor of the Department of Information Technologies and Applied Mathematics of Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine;

Suryaninov M., Doctor of Technical Science, Professor, Head of Structural Mechanics Department, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine;

Assistant Editor: Kiosak V., Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Professor of Higher Mathematics Department, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine;

- Berbyuk V., Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Professor in Mechanical Systems, Division of Dynamics, Department of Mechanics and Maritime Sciences Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden;
- Vatulia G., Doctor of Technical Science, Professor, Professor of Structural Mechanics and Hydraulics Department, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine;
- Goryk O., Doctor of Technical Science, Professor, Head of Basic Technical Disciplines Department, Poltava State Agrarian Academy, Poltava, Ukraine;
- Kyriazopoulos A., Ph.D., Professor Department of Civil Engineering University of West Attica, Athens, Greece;
- Koda E., Doctor of Technical Science, Professor, Dean of Construction and Environmental Engineering Faculty, University of Life Sciences, Warsaw, Poland;
- Kononov Y., Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of Control-system Theory Division, Institute of Applied Mathematics and Mechanics, National Academy of Sciences of Ukraine, Slavyansk, Ukraine;
- Kruglov V., Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Professor of Chair of Methods of Mathematical Physics Odessa I. I. Mechnikov National University, Odesa, Ukraine;
- Kucher M., Doctor of Technical Science, Professor, Head of Structural Materials Division, G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength, National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine;
- Lazareva D., Ph.D., Associate Professor, Head of the Department of Information Technologies and Applied Mathematics of Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine;
- Lesechko O., Ph.D., Associate Professor, Head of Higher Mathematics Department, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine;
- Leshchenko D., Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of Theoretical Mechanics Department, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine;
- Lyashenko T., Doctor of Technical Science, Professor, Professor of Information Technology and Applied Mathematics Department, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine;
- Maksymovych O., Doctor of Technical Science, Professor, Professor of Department of Welding Engineering, Diagnostics and Rebuilding of Metal Structures, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine;
- Otrosh Y., Doctor of Technical Science, Professor, Head of Department of Civil Protection Service, National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine;
- Pasternak Y., Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of Applied Mathematics and Mechanics Department, Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine;
- Pnevmatikos N., Ph.D., Associate Professor Department of Civil Engineering University of West Attica, Athens, Greece;
- Savchenko O., Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Professor of Algebra, Geometry and Mathematical Analysis Department, Kherson State University, Kherson, Ukraine;
- Trach V., Doctor of Technical Science, Professor, Head of Department of Bridges and Tunnels, Strength of Materials and Structural Mechanics, National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine;
- Shvabyuk V., Doctor of Technical Science, Professor, Professor of Engineering Mechanics Department, Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine.

Technical Editor: Natalia Teorlo, Postgraduate Student

Linguistic Adviser in English language: Yanina Marianko, Ph.D., Associate Professor,
Head of the Department of Foreign Languages

ЗМІСТ

Кровяков С. О., Ігнатенко А. В., Шестакова Л. Є., Заволока М. В. Пошук оптимальних складів фібробетонів жорсткого дорожнього покриття з використанням експериментально-статистичних моделей	6
I. Medved, Yu. Otrosh, N. Rashkevich Optimization of building structures.....	17
A. Bepalova, A. Knysh, O. Dashkovska, O. Faizulyna, T. Chumachenko Modeling the acoustic field based on sound disperersion during reflections of wave tracing in open areas.....	26
Пурденко Р. Р., Отрош Ю. А., Рашкевич Н. В., Сур'янінов В. М. Моделювання стійкості та надійності системи ґрунт-фундамент-будівля при дії силових та високотемпературних впливів.....	36
Фомін В. М., Фоміна І. П. Математичне моделювання динамічних впливів на будівельні конструкції.....	49
Арсирій В. А., Крошка О. В. Метод удосконалення проточних частин елементів енергетичних систем житлових комплексів.....	57
Човнюк Ю. В., Приймаченко О. В., Чередніченко П. П., Турчанінова Л. І., Шудра Н. С. Фундаментальний аналіз та оптимізація (мінімізація) динамічних навантажень у пружних елементах механізмів підйому вантажу кранів. Частина I.....	74
Човнюк Ю. В., Чередніченко П. П., Васильєва Г. Ю., Турчанінова Л. І., Шудра Н. С. Фундаментальний аналіз та оптимізація (мінімізація) динамічних навантажень у пружних елементах механізмів підйому вантажу кранів. Частина II	84
Ічанська Н. В. Засоби та інструменти для розробки веб-додатку з тестування рівня знань студентів	95
Адаменко В. М., Дзюбко Д. А., Романишен О. В. Дослідження напружено-деформованого стану вузлів сталезалізобетонних каркасно-монолітних будівель за допомогою інформаційних технологій розрахунку та будівельного інформаційного моделювання.....	107
D. Kirichenko, V. Yesvandzhyia Finite element analysis of damaged beams reinforced with fiber concrete.....	127
S. Bekshaev Numerical study of the influence of the length of a rod on its critical forces.....	134

CONTENT

S. Kroviakov, A. Ihnatenko, L. Shestakova, M. Zavoloka Search for optimal compositions of fiber-reinforced concrete for rigid pavement using experimental statistical models	6
I. Medved, Yu. Otrosh, N. Rashkevich Optimization of building structures.....	17
A. Bespalova, A. Knysh, O. Dashkovska, O. Faizulyna, T. Chumachenko Modeling the acoustic field based on sound dispersion during reflections of wave tracing in open areas.....	26
R. Purdenko, Yu. Otrosh, N. Rashkevich, S. Suryanin Simulation of stability and reliability of the soil-foundation-building system under force and high-temperature influences.....	36
V. Fomin, I. Fomina Mathematical modeling of dynamic impacts on building structures.....	49
V. Arsirii, O. Kroshka Improvement method of flow parts of energy system elements of residential complexes.....	57
Yu. Chovniuk, O. Priymachenko, P. Cherednichenko, L. Turchaninova, N. Shudra Fundamental analysis and optimization (minimization) of dynamic loads in elastic elements of cranes load lifting mechanisms. Part I.....	74
Yu. Chovniuk, P. Cherednichenko, H. Vasylieva, L. Turchaninova, N. Shudra Fundamental analysis and optimization (minimization) of dynamic loads in elastic elements of cranes load lifting mechanisms. Part II.....	84
V. Ichanska Tools and instruments for developing a web application with student knowledge level testing.....	95
V. Adamenko, D. Dziubko, O. Romanyshe Stress-strain state investigation of nodes of composite steel-reinforced concrete frame-monolithic buildings using information technology for structural analysis and building information modeling.....	107
D. Kirichenko, V. Yesvandzhyia Finite element analysis of damaged beams reinforced with fiber concrete.....	124
S. Bekshaev Numerical study of the influence of the length of a rod on its critical forces.....	134

УДК 691.32

ПОШУК ОПТИМАЛЬНИХ СКЛАДІВ ФІБРОБЕТОНІВ ЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО- СТАТИСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

Кровяков С. О.¹, Ігнатенко А. В.¹, Шестакова Л. Є.¹, Заволока М. В.¹

¹Одеська державна академія будівництва та архітектури

Анотація: За 15-ти точковим планом проведений експеримент, в якому варіювалися наступні 3 фактори складу фібробетонів жорсткого дорожнього покриття: кількість портландцементу від 290 до 350 кг/м³, кількість базальтової фібри від 0,9 до 1,5 кг/м³, кількість суперпластифікатора від 0,6 до 1% від маси цементу. Отримано комплекс експериментально-статистичних моделей, які описують вплив факторів на міцність на стиск, міцність на розтяг при згині, морозостійкість, стиранність і собівартість фібробетонів. З використанням даних моделей проведено вибір оптимальних складів фібробетонів жорстких дорожніх покриттів для доріг II-III та Iб категорій.

Вибір оптимальних складів фібробетонів здійснювався графічним методом на діаграмах типу квадрат. Застосовано прийом представлення факторного простору у вигляді 7 діаграм типу «квадрат» при фіксуванні кількості цементу у складі від 290 до 350 кг/м³ з кроком 10 кг/м³. Така дискретизація дозволяє наочніше і точніше проводити пошук оптимальних рішень.

У якості критеріїв обмеження використовувалися рівні міцності на стиск, міцності на розтяг при згині і морозостійкості, які відповідають вимогами ДБН В.2.3-4:2015 до матеріалів покриттів доріг відповідної категорії. У якості критерію оптимізації використовувався показник собівартості бетону. При виборі також контролювалася стиранність бетону.

Обрано два склади фібробетонів для доріг II і III категорій, які мають міцність на стиск 43 і 45 МПа, міцність на розтяг при згині 5 і 5,1 МПа, стриманість близько 0,36 г/см² і морозостійкість F200. Також обрано два склади фібробетонів для доріг Iб категорії. Дані склади мають міцність на стиск 48 і 50 МПа, міцність на розтяг при згині 5,5 МПа, стриманість близько 0,35 г/см² і морозостійкість F200.

Обрані склади мають найменшу собівартість при забезпеченій міцності та довговічності матеріалу. Застосування таких фібробетонів дозволяє підвищити міжремонтні інтервали при експлуатації цементобетонних доріг в типових для України кліматичних умовах.

Ключові слова: жорстке дорожнє покриття, експериментально-статистична модель, оптимізація, базальтова фібра, суперпластифікатор.

SEARCH FOR OPTIMAL COMPOSITIONS OF FIBER- REINFORCED CONCRETE FOR RIGID PAVEMENT USING EXPERIMENTAL STATISTICAL MODELS

S. Kroviakov¹, A. Ihnatenko¹, L. Shestakova¹, M. Zavaloka¹

¹Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract: The experiment was conducted according to a 15-point plan. In the experiment, the following three factors of the composition of rigid pavement fiber-reinforced concrete varied: the amount of Portland cement from 290 to 350 kg/m³, the amount of basaltic fiber from 0.9 to 1.5 kg/m³,

the amount of superplasticizer from 0.6 to 1% of the cement mass. A set of experimental statistical models was obtained. They describe the influence of factors on compressive strength, flexural strength, frost resistance, abrasion resistance and cost of fiber-reinforced concrete. The selection of optimal compositions of fiber-reinforced concrete rigid pavement for the roads of II-III and Ib categories was carried out using these models.

The selection of optimal compositions of fiber-reinforced concrete was carried out graphically using square diagrams. The method of representing the factor space as 7 "square" type diagrams was used when fixing the amount of cement in the composition from 290 to 350 kg/m³ with a step of 10 kg/m³. This discretization allows for a clearer and more accurate search for optimal solutions.

The levels of compressive strength, flexural strength and frost resistance were used as limitation criteria. These levels meet the requirements of DBN B.2.3-4:2015 for rigid pavement materials of the corresponding category. The concrete cost index was used as an optimization criterion. The abrasion resistance of concrete was also controlled to guarantee a correct choice.

Two compositions of fiber-reinforced concrete for the roads of the II and III categories were chosen. These compositions have a compressive strength of 43 and 45 MPa, a flexural strength of 5 and 5.1 MPa, abrasion of about 0.36 g/cm² and frost resistance of F200. Two compositions of fiber-reinforced concrete for category Ib roads were also selected. These compositions have a compressive strength of 48 and 50 MPa, a flexural strength of 5.5 MPa, abrasion of about 0.35 g/cm² and frost resistance of F200.

The compositions have chosen the lowest cost price while ensuring the strength and durability of the material. The use of this fiber-reinforced concrete makes it possible to increase the intervals between repairs during the maintenance of cement concrete roads in typical climatic conditions in Ukraine.

Keywords: rigid pavement, experimental statistical model, optimization, basalt fiber, superplasticizer.

1 ВСТУП

В останні роки в Україні все активніше будуються дороги з жорсткими покриттями. Також цементобетонні покриття все частіше використовуються при реконструкції доріг, насамперед на найбільш завантажених ділянках. Жорсткі покриття в порівнянні асфальтобетонними покриттями краще розподіляють навантаження на ґрунт, не схильні до утворення колій та хвиль і мають значно більшу довговічність. Дисперсне армування не схильною до корозії фіброю дозволяє ще більше підвищити довговічність та міцність бетонів дорожніх покриттів.

Проте вартість влаштування цементобетонних доріг є дещо вищою, що обумовлено насамперед вартістю самого бетону. Тому задача пошуку оптимальних з точки зору механічних характеристик, довговічності та вартості складів бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів є актуальною. Ефективно вирішувати такі задачі дозволяє використання методу багатокритеріального аналізу, який спирається на експериментально-статистичні моделі. При цьому важливо орієнтуватися на реальну ринкову вартість компонентів бетонних сумішей.

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У США та більшості країн Європейського союзу частка автомобільних доріг з жорсткими покриттями становить від 25 до 40%. Простежується тенденція до зростання будівництва цементобетонних автомагістралей у Китаї та Японії [1].

Незважаючи на великий світовий досвід будівництва цементобетонних доріг при їх проектуванні та розробці складів бетонів дорожніх покриттів необхідно приділяти особливу увагу використанню місцевих будівельних матеріалів. В свою чергу, це вимагає постійної оптимізації складів бетонів в залежності від вимог до бетону, застосованих матеріалів та рівня ринкових цін на ці матеріали [2,3].

В Україні основними причинами пошкоджень і зношення дорожніх покриттів в процесі експлуатації є дія заморожування і відтавання та динамічних впливів коліс транспорту. В умовах таких впливів ефективними матеріалами для дорожніх покриттів є фібробетони зі стійкою до корозії дисперсною арматурою, зокрема поліпропіленовою базальтовою і скляною [4,5]. Базальтові волокна можна рекомендувати до масового використання у дорожньому будівництві завдяки їх порівняно низькій вартості та здатності достатньо легко розподілятися в бетонній суміші при перемішуванні [6,7].

Відомо, що бетони і фібробетони жорстких дорожніх покриттів можуть забезпечувати необхідний рівень механічних властивостей та економічної ефективності лише при застосуванні сучасних суперпластифікаторів [2,8]. Тому використання таких добавок є нормою у практиці виробництва бетонів.

При пошуку оптимальних складів багатоконпонентних матеріалів, зокрема бетонів, ефективним є використання методів планування експерименту та експериментально-статистичного (ЕС) моделювання [9,10]. Отриманий завдяки застосуванню таких методів комплекс ЕС-моделей, які відображають зв'язок складу багатоконпонентного матеріалу з його властивостями, дозволяє провести багатокритеріальну оптимізацію складу дослідженого матеріалу [9,11].

3 ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є вибір оптимальних з позиції міцності, довговічності та собівартості складів фібробетонів жорсткого дорожнього покриття для автомобільних доріг II-III та Іб категорій.

Міцність бетонів на стиск і на розтяг при згині, а також морозостійкість бетонів мають відповідати вимогам ДБН В.2.3-4:2015 [12] для відповідної категорії. До бетонів доріг II і III категорій висуваються однакові вимоги, до бетонів доріг Іб категорії – вищі. При цьому собівартість обраних складів має бути близькою до мінімальної. Це важливо з врахуванням значного об'єму бетону, що використовується при влаштуванні жорстких дорожніх покриттів. Також при виборі оптимальних складів враховується зносостійкість (стиранність) досліджених фібробетонів, яка разом з морозостійкістю є важливою з позиції забезпечення довговічності дорожнього покриття.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

За 15-ти точковим оптимальним симетричним планом був проведений експеримент, в якому варіювалися наступні 3 фактори складу фібробетонів жорсткого дорожнього покриття [13]:

- X_1 , кількість портландцементу ПЦ І-500Р-Н, від 290 до 350 кг/м³;
- X_2 , кількість базальтової фібри ВАUCON®-bazalt, від 0,9 до 1,5 кг/м³;
- X_3 , кількість суперпластифікатору STACHEMENT 2570/5/G, від 0,6 до 1% від маси цементу.

При побудові ЕС-моделей перехід від натуральних до кодованих рівнів варійованих факторів виконано за типовою процедурою [9,11].

Всі бетонні суміші мали рівну рухомість S1 (ОК = 2..3 см). При виборі оптимальних складів фібробетонів жорстких дорожніх покриттів використовувався наведений нижче комплекс ЕС-моделей, що описують вплив варійованих факторів складу бетону на його властивості.

Вплив на міцність на стиск:

$$f_{cm}(\text{МПа}) = 51,58 + 9,33x_1 - 1,43x_1^2 \pm 0x_1x_2 + 0,31x_1x_3 + 0,94x_2 - 0,78x_2^2 - 0,26x_2x_3 \quad (1)$$

Вплив на міцність на розтяг при згині:

$$f_{c.tf}(\text{МПа}) = 5,722 + 0,832x_1 - 0,268x_1^2 \pm 0x_1x_2 \pm 0x_1x_3 + 0,341x_2 - 0,283x_2^2 - 0,26x_2x_3 + 0,101x_3 - 0,173x_3^2 \quad (2)$$

Вплив на морозостійкість:

$$F(\text{цикли}) = 240 + 55x_1 + 25x_1^2 \pm 0x_1x_2 \pm 0x_1x_3 + 15x_2 - 25x_2^2 \pm 0x_1x_2 + 15x_3 - 25x_3^2 \quad (3)$$

Вплив на стиранність:

$$G(\text{г/см}^2) = 0,340 - 0,027x_1 + 0,009x_1^2 - 0,006x_1x_2 \pm 0x_1x_3 - 0,019x_2 + 0,009x_2^2 \pm 0x_2x_3 - 0,005x_3 + 0,009x_3^2 \quad (4)$$

Вплив на собівартість бетону, розраховану в цінах грудня 2023 року:

$$\begin{aligned} \text{Var} (\text{грн./ м}^3) = & 3151,12 + 155,53x_1 \pm 0x_1^2 + 12,31x_1x_2 + 17,440x_1x_3 \\ & + 47,05x_2 \pm 0x_2^2 - 12,81x_2x_3 \\ & + 43,27x_3 - 10,79x_3^2 \end{aligned} \quad (5)$$

Вибір оптимальних складів фібробетонів здійснювався графічним методом на діаграмах типу квадрат [9]. Тривимірна діаграма типу «куб» охоплює весь факторний простір експерименту, але при одночасному накладенні на діаграмі такого типу значного числа ізоповрхонь декількох показників її читання стає складним. Тому в даному дослідженні було застосовано прийом представлення факторного простору у вигляді 7 діаграм типу «квадрат» з осями X_2 і X_3 . Квадрати будувалися при фіксуванні рівня фактору x_1 від -1 до $+1$ з кроком $0,333$, що відповідає кількості цементу у складі від 290 до 350 кг/м^3 з кроком 10 кг/м^3 (рис.1, рис.2). Така дискретизація дозволяє наочніше і точніше проводити пошук оптимальних рішень.

Як відмічалось вище, проводився вибір оптимальних складів фібробетонів жорсткого дорожнього покриття для автомобільних доріг II і III категорій та окремо для доріг Ib категорії. Відповідно керуючись вимогами ДБН В.2.3-4:2015 (додаток К) [12] до матеріалів покриттів доріг II і III категорій у якості критеріїв обмеження використовувалися такі значення характеристик фібробетонів (рис.1):

- міцність на стиск $f_{cm} \geq 40 \text{ МПа}$ (клас В30, С25/30), побудовані за ЕС-моделлю (1) ізолінії зеленого кольору;

- міцність на розтяг при згині $f_{c,tf} \geq 5 \text{ МПа}$ (клас В_{btb}4,0), побудовані за ЕС-моделлю (2) ізолінії червоного кольору;

- морозостійкість $\geq \text{F200}$, побудовані за ЕС-моделлю (3) ізолінії синього кольору.

У якості критерію оптимізації [9,11] використовувався показник собівартості бетону. Ізолінії собівартості побудовані за ЕС-моделлю (5) і показані на діаграмах сірим кольором. При виборі також контролювалася стиранність бетону. Ізолінії стиранності побудовані за ЕС-моделлю (4) і показані штиховими лініями коричневого кольору.

Області діаграм, які не відповідали критеріям обмеження за міцністю і морозостійкістю, заштриховувалися відповідним кольором. У не заштрихованих зонах, тобто при виконанні всіх визначених критеріїв якості, було обрано два оптимальних складу фібробетонів для доріг II і III категорій. Перший склад при кількості цемент 300 кг/м^3 (рис.1.б), другий – при кількості цемент 310 кг/м^3 (рис.1.в). Координати даних складів помічено на діаграмах зірками з відповідними цифрами.

Аналогічним чином, керуючись вимогами ДБН В.2.3-4:2015, при виборі оптимальних складів фібробетонів для доріг Ib категорії у якості критеріїв обмеження використовувалися такі значення (рис.2):

- міцність на стиск $f_{cm} \geq 45 \text{ МПа}$ (клас В35, С28/35);

- міцність на розтяг при згині $f_{c,tf} \geq 5,5 \text{ МПа}$ (клас В_{btb}4,4);

- морозостійкість $\geq \text{F200}$.

Для доріг Ib категорій також було обрано два оптимальних складу фібробетонів, координати яких помічено на діаграмах зірками з відповідними цифрами. Перший склад при кількості цемент 310 кг/м^3 (рис.2.в), другий – при кількості цемент 320 кг/м^3 (рис.2.г).

5 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Обраний склад №1 для доріг II і III категорій має найменшу собівартість при забезпеченні необхідних рівнів всіх висунутих критеріїв – 3040 грн./м³. Координати точки даного складу фібробетону в факторному просторі експерименту є наступними: $x_1 = -0,667$, $x_2 = 0,18$, $x_3 = -0,45$.

Склад №2 доріг II і III категорій має собівартість 3060 грн./м³, що лише на 0,66% вище собівартості складу №1. При цьому у порівнянні зі складом №1 фібробетон складу №2 характеризується дещо вищою міцністю на стиск. Координати точки даного складу є наступними: $x_1 = -0,333$, $x_2 = -0,4$, $x_3 = -0,45$.

Склад №1 для доріг Iб категорії має собівартість 3120 грн./м³. Координати точки даного складу фібробетону є наступними: $x_1 = -0,333$, $x_2 = 0,38$, $x_3 = 0,1$.

Склад №2 для доріг Iб категорії має майже аналогічну собівартість – 3125 грн./м³, при цьому характеризується дещо вищою міцністю на стиск. Координати точки даного складу фібробетону: $x_1 = 0$, $x_2 = -0,1$, $x_3 = -0,55$.

Вміст компонентів суміші у обраних складах і розрахункові механічні характеристики фібробетонів даних оптимальних складів наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Обрані оптимальні складі фібробетонів дорожніх покриттів
та їх механічні характеристики

№ складу	Склад фібробетону	Розрахункові механічні характеристики та собівартість
№1 для доріг II і III категорій	Цемент – 300 кг/м ³ Щебінь – 1222 кг/м ³ Пісок – 835 кг/м ³ Фібра VAUCON®-bazalt – 1,26 кг/м ³ Добавка STACHEMENT 2570/5/G – 2,13 кг/м ³ Вода – 126 л/м ³	Міцність на стиск $f_{cm} = 43$ МПа Міцність на розтяг при згині $f_{c.tf} = 5$ МПа Морозостійкість F200 Стиранність $G = 0,365$ г/см ² Собівартість – 3040 кг/м ³
№2 для доріг II і III категорій	Цемент – 310 кг/м ³ Щебінь – 1219 кг/м ³ Пісок – 821 кг/м ³ Фібра VAUCON®-bazalt – 1,08 кг/м ³ Добавка STACHEMENT 2570/5/G – 2,20 кг/м ³ Вода – 129 л/м ³	Міцність на стиск $f_{cm} = 46$ МПа Міцність на розтяг при згині $f_{c.tf} = 5,1$ МПа Морозостійкість F200 Стиранність $G = 0,357$ г/см ² Собівартість – 3060 кг/м ³
№1 для доріг Iб категорії	Цемент – 310 кг/м ³ Щебінь – 1219 кг/м ³ Пісок – 820 кг/м ³ Фібра VAUCON®-bazalt – 1,32 кг/м ³ Добавка STACHEMENT 2570/5/G – 2,54 кг/м ³ Вода – 128 л/м ³	Міцність на стиск $f_{cm} = 48$ МПа Міцність на розтяг при згині $f_{c.tf} = 5,5$ МПа Морозостійкість F200 Стиранність $G = 0,344$ г/см ² Собівартість – 3120 кг/м ³
№2 для доріг Iб категорії	Цемент – 320 кг/м ³ Щебінь – 1215 кг/м ³ Пісок – 803 кг/м ³ Фібра VAUCON®-bazalt – 1,17 кг/м ³ Добавка STACHEMENT 2570/5/G – 2,22 кг/м ³ Вода – 134 л/м ³	Міцність на стиск $f_{cm} = 50$ МПа Міцність на розтяг при згині $f_{c.tf} = 5,5$ МПа Морозостійкість F200 Стиранність $G = 0,35$ г/см ² Собівартість – 3125 кг/м ³

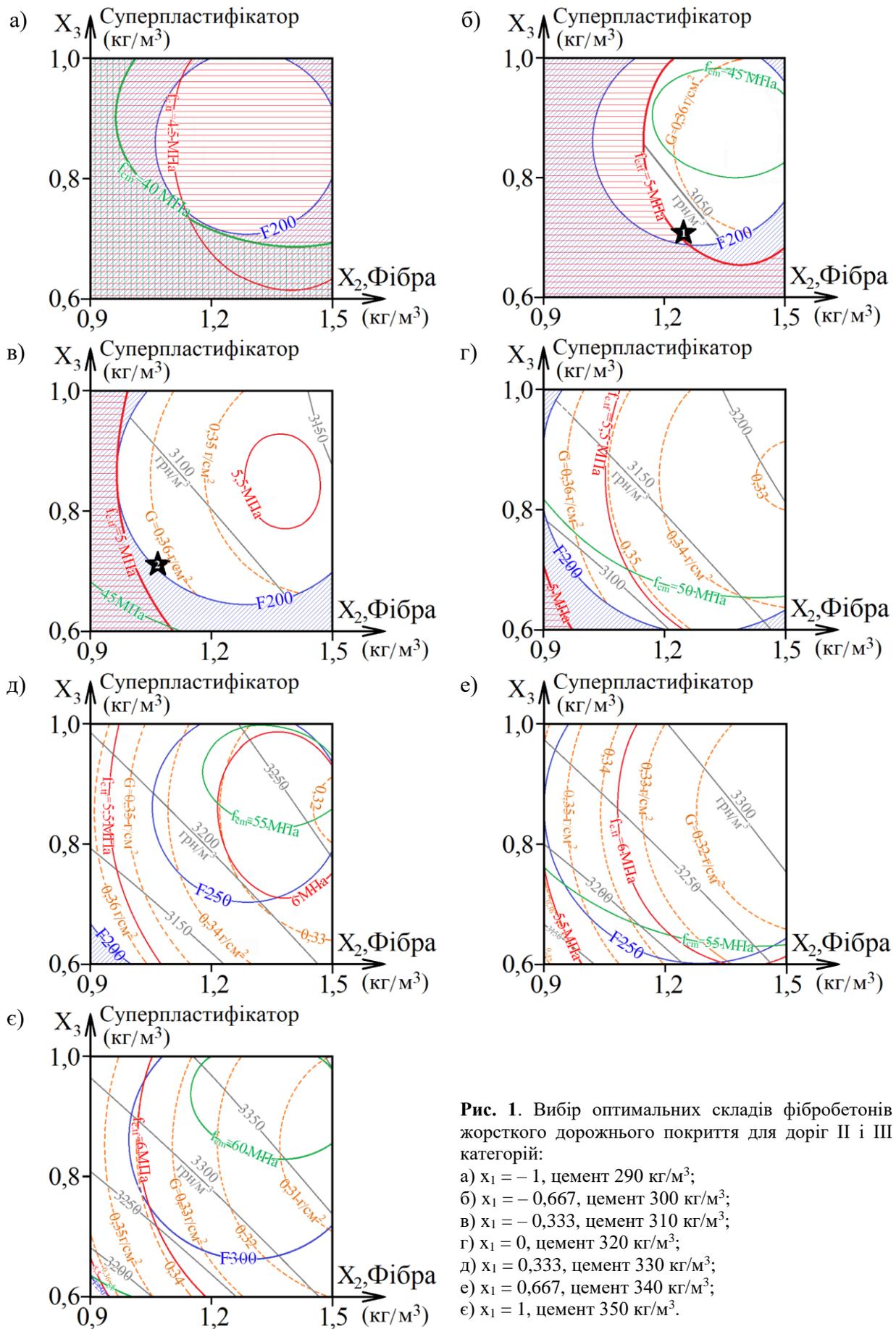


Рис. 1. Вибір оптимальних складів фібробетонів жорсткого дорожнього покриття для доріг II і III категорій:

- а) $x_1 = -1$, цемент 290 кг/м³;
- б) $x_1 = -0,667$, цемент 300 кг/м³;
- в) $x_1 = -0,333$, цемент 310 кг/м³;
- г) $x_1 = 0$, цемент 320 кг/м³;
- д) $x_1 = 0,333$, цемент 330 кг/м³;
- е) $x_1 = 0,667$, цемент 340 кг/м³;
- є) $x_1 = 1$, цемент 350 кг/м³.

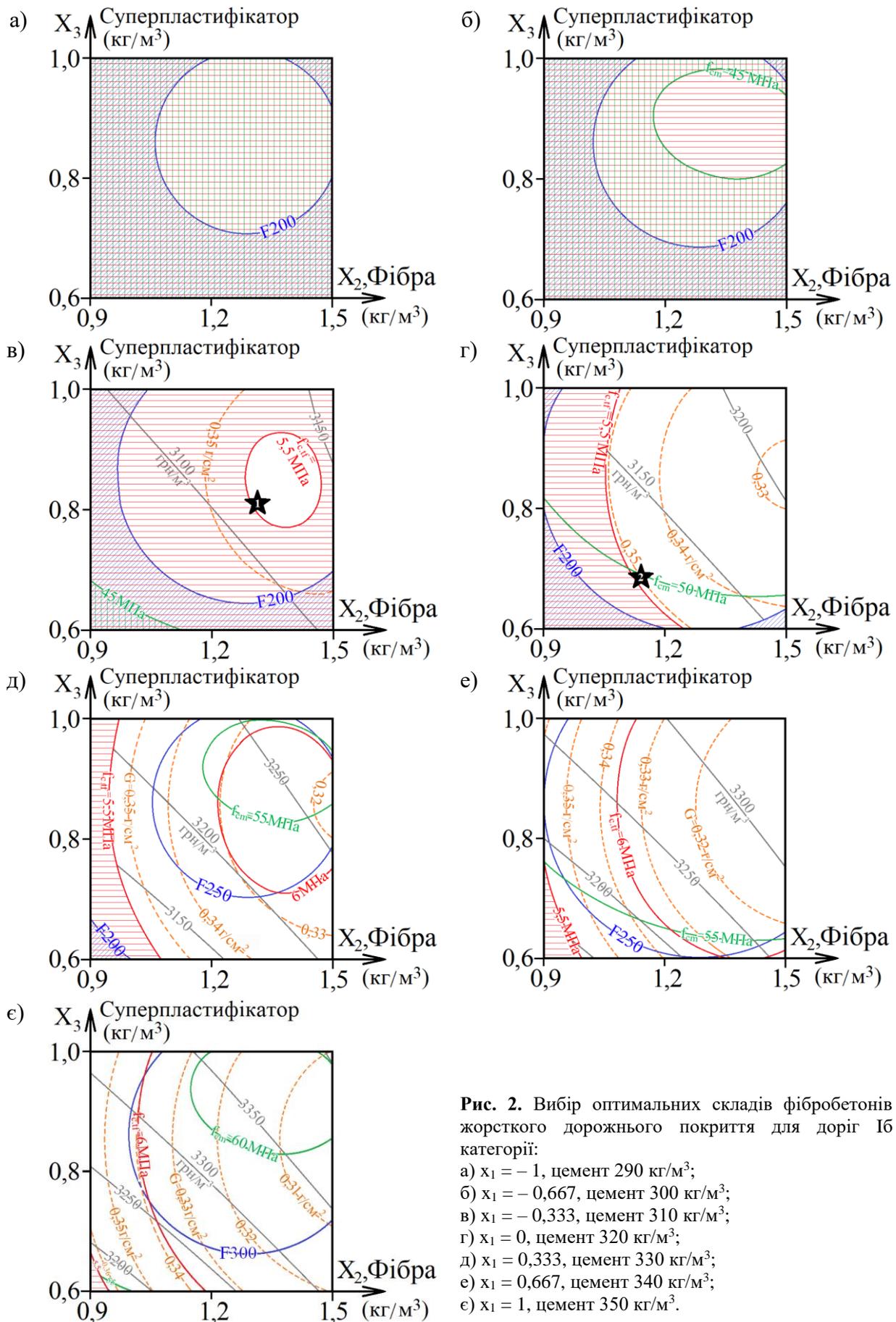


Рис. 2. Вибір оптимальних складів фібробетонів жорсткого дорожнього покриття для доріг Іб категорії:

- а) $x_1 = -1$, цемент 290 кг/м³;
- б) $x_1 = -0,667$, цемент 300 кг/м³;
- в) $x_1 = -0,333$, цемент 310 кг/м³;
- г) $x_1 = 0$, цемент 320 кг/м³;
- д) $x_1 = 0,333$, цемент 330 кг/м³;
- е) $x_1 = 0,667$, цемент 340 кг/м³;
- є) $x_1 = 1$, цемент 350 кг/м³.

6 ВИСНОВКИ

З використанням комплексу 3-х факторних ЕС-моделей проведена багатокритеріальна оптимізація та обрані оптимальні склади фібробетонів жорсткого дорожнього покриття для доріг різних категорій. Обрані склади мають найменшу собівартість при забезпеченій міцності та довговічності матеріалу. Застосування таких фібробетонів дозволяє підвищити міжремонтні інтервали при експлуатації цементобетонних доріг в типових для України кліматичних умовах.

7 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Автори не мають будь-яких фінансових чи нефінансових інтересів щодо матеріалів, представлених у цій статті, які слід розкривати.

Література

1. Гамеляк І. П., Островерхий О. Г., Мороз В. С. Історія та перспективи будівництва цементобетонних покриттів автомобільних доріг та аеродромів в Україні. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, 2019, Вип.106, С. 60-76.
2. Дворкін Л. Й. Бетони спеціального призначення. Київ: Кондор. 2018. 354 с.
3. Гамеляк І. П., Шургая А. Г., Якименко Я. М., Чиженко Н. П. Математичні моделі властивостей високоміцних бетонів для дорожнього будівництва. Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2017, №169, С. 103-110. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.169.2017.111084>
4. Hussain I., Ali B., Akhtar T., Jameel M.S., Raza S.S. Comparison of mechanical properties of concrete and design thickness of pavement with different types of fiber-reinforcements (steel, glass, and polypropylene). Case Studies in Construction Materials. 2020, 13, e00429. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00429>.
5. Kos Ž., Kroviakov S., Kryzhanovskiy V., Crnoja A. Influence of fibers and hardening accelerator on the concrete for rigid pavements. Magazine of Concrete Research, 2023, 75(17), pp. 865-873. <https://doi.org/10.1680/jmacr.22.00181>
6. Wu H., Qin X., Huang X., Kaewunruen S. Engineering, mechanical and dynamic properties of basalt fiber reinforced concrete. Materials. 2023, 16, 623. <https://doi.org/10.3390/ma16020623>
7. Jin Sj., Yang Yh., Sun Ym., Li X., Xu Jy. Experimental research on anti-freezing and thawing performance of basalt fiber reinforced fly ash concrete in the corrosive conditions. KSCE Journal of Civil Engineering. 2023, 27, pp. 3455–3470. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-1969-9>
8. Tahir M.F.M., Abdullah M.M.A.B., Rahim S.Z.A., Mohd Hasan M.R., Sandu A.V., Vizureanu P., Ghazali C.M.R., Kadir A.A. Mechanical and durability analysis of fly ash based geopolymers with various compositions for rigid pavement applications, Materials, 2022, 15, 3458. <https://doi.org/10.3390/ma15103458>
9. Ляшенко Т.В., Вознесенский В.А. Методология рецептурно-технологических полей в компьютерном строительном материаловедении. Одесса: Астропринт, 2017. 168 с.
10. Dvorkin L., Dvorkin O., Ribakov Y. Mathematical experiment planning in concrete technology. 2012, Nova Science Publishers, 173 p.
11. Дворкін Л. Й. Експериментально-статистичне моделювання при проектуванні складів бетонів. К.: Кондор. 2020. 205 с.
12. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. [Чинний від 2016-04-01]. Вид. офіц. Київ, 2015. 113 с.
13. Кровяков, С. О., Шестакова, Л. Є. Вплив базальтової фібри і суперпластифікатору на міцність бетонів жорстких дорожніх покриттів. Сучасне будівництво та архітектура, 2023, №6, С.99-108. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2023-6-99-108>

References

1. Gameliak, I. P., Ostroverkhyi, O. G., Moroz, V. S. (2019). Istoriya ta perspektyvy budivnytstva tsementobetonnykh pokryttiv avtomobil'nykh doroh ta aerodromiv v Ukraini [History and perspectives of construction cement-concrete road and airfield pavement in Ukraine]. *Automobile roads and road construction*. Iss. 106. 60–76. [in Ukraine].
2. Dvorkin, L. Y. (2018) Betony spetsial'noho pryznachennya [Special purpose concretes] (monograph) Kyiv: Kondor. 354.
3. Gameliak, I. P., Shurgaya, A. G., Jakymenko, J. M., Chyzhenko N. P. (2017) Matematychni modeli vlastyvostry vysokomitsnykh betoniv dlya dorozhn'oho budivnytstva [Mathematical models of the properties of high-strength cement – concrete for road construction]. *Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport*. 169. 103–110. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.169.2017.111084> [in Ukraine].
4. Hussain, I., Ali, B., Akhtar, T., Jameel, M.S., Raza, S.S. (2020) Comparison of mechanical properties of concrete and design thickness of pavement with different types of fiber-reinforcements (steel, glass, and polypropylene). *Case Studies in Construction Materials*. 13. e00429. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00429>.
5. Kos, Ž., Kroviakov, S., Kryzhanovskiy, V., Crnoja, A. (2023) Influence of fibers and hardening accelerator on the concrete for rigid pavements. *Magazine of Concrete Research*. 75(17). 865-873. <https://doi.org/10.1680/jmacr.22.00181>
6. Wu, H., Qin, X., Huang, X., Kaewunruen, S. (2023) Engineering, mechanical and dynamic properties of basalt fiber reinforced concrete. *Materials*. 16, 623. <https://doi.org/10.3390/ma16020623>
7. Jin, S.J., Yang, Y.H., Sun, Y.M., Li, X., Xu, J.Y. (2023) Experimental research on anti-freezing and thawing performance of basalt fiber reinforced fly ash concrete in the corrosive conditions. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 27, 3455–3470. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-1969-9>
8. Tahir, M.F.M., Abdullah, M.M.A.B., Rahim, S.Z.A., Mohd Hasan, M.R., Sandu, A.V., Vizureanu, P., Ghazali, C.M.R., Kadir, A.A. (2022) Mechanical and durability analysis of fly ash based geopolymer with various compositions for rigid pavement applications, *Materials*. 15, 3458. <https://doi.org/10.3390/ma15103458>
9. Lyashenko, T. V., Voznesenskiy, V. A. (2017) Metodologiya retsepturno-tekhnologicheskikh poley v komp'yuternom stroitel'nom materialovedenii [Methodology of recipe-technological fields in computer construction materials science]. Odesa: Astroprint, 168 [in Russian].
10. Dvorkin, L., Dvorkin, O., Ribakov, Y. (2012) Mathematical experiment planning in concrete technology, Nova Science Publishers, 173.
11. Dvorkin, L. Y. (2020) Eksperymental'no-statystychni modelyuvannya pry proektuvanni skladiv betoniv [Experimental and statistical modeling in the design of concrete compositions]. Kyiv: Kondor, 205 [in Ukraine].
12. DBN V.2.3-4:2015. Avtomobil'ni dorohy. Sporudy transportu. Chastyna I. Proektuvannya. Chastyna II. Budivnytstvo [Automobile roads. Part I. Design. Part II. Construction]. Minrehionbud Ukrainy, 2015 [in Ukraine].
13. Kroviakov, S. O., Shestakova, L. Y. (2023) Vplyv bazal'tovoyi fibry i superplastyfikatoru na mitsnist' betoniv zhorstkykh dorozhnykh pokryttiv [The influence of basalt fiber and superplasticizer on the strength of concrete for rigid pavements]. *Modern construction and architecture*, 2023, 6, 99-108 <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2023-6-99-108>

Кровяков Сергій Олексійович

Одеська державна академія будівництва та архітектури,
д.т.н., професор
вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, Україна, 65029
skrovyakov@ukr.net
ORCID: 0000-0002-0800-0123

Ігнатенко Андрій Васильович

Одеська державна академія будівництва та архітектури,
к.т.н., доцент
вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, Україна, 65029
andreykhadi@gmail.com



ORCID: 0000-0001-9222-1051

Шестакова Любов Євгенівна

Одеська державна академія будівництва та архітектури,
аспірантка

вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, Україна, 65029

shestakova_luba@ukr.net

ORCID: 0000-0002-3449-8498

Заволока Михайло Васильович

Одеська державна академія будівництва та архітектури,
к.т.н., професор

вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, Україна, 65029

mvzavoloka@ukr.net

ORCID: 0000-0002-2080-1230

Для посилань:

Кровяков С. О., Ігнатенко А. В., Шестаков Л. Є., Заволока М. В. Пошук оптимальних складів фібробетонів жорсткого дροжнього покриття з використанням експериментально-статистичних моделей. Механіка та математичні методи, 2024. Т. 6. № 1. С. 6–16.

For references:

S. Kroviakov, A. Ihnatenko, L. Shestakova, M. Zavoloka. (2024). Search for optimal compositions of fiber-reinforced concrete for rigid pavement using experimental statistical models. Mechanics and Mathematical Methods. 6 (1). 6–16.

UDK 624.04

OPTIMIZATION OF BUILDING STRUCTURES

I. Medved¹, Yu. Otrosh², N. Rashkevich²

¹*Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*

²*National University of Civil Defence of Ukraine*

Abstract. In the field of the theory of calculation of building structures, there is a constant refinement of the actual operation of these structures, i.e. design schemes are created that most accurately correspond to actual operating conditions. Creating optimal structures is a very urgent task facing designers. Therefore, it is quite natural to try to solve this problem using mathematical programming methods, which involve: selecting dependent and independent variables, constructing mathematical models and establishing criteria for the effectiveness of the selected model. In this case, the model should be a function that fairly accurately describes the research being carried out using mathematical apparatus (various types of functions, equations, systems of equations and inequalities, etc.). In mathematical programming, any set of independent (controlled) variables is called a solution. Optimal solutions are those that, for one reason or another, are preferable to others. The preference (effectiveness) of the study is quantified by the numerical value of the objective function. "Solution Search" is an add-in for Microsoft Excel that is used to solve optimization problems. Simply put, with the Solver add-in, you can determine the maximum or minimum value of one cell by changing other cells. Most often, this add-in is used to find optimal solutions to problems economically. There are not enough results of using this approach for calculating building structures in the public domain. Therefore, it is quite logical to try to use this add-on in problems of optimization of building structures. In this work, an attempt was made to use mathematical programming methods and this add-on to optimize the geometric dimensions of the structure, when the numerical value of the bending moment in a specific section was chosen as an optimization criterion.

Keywords: calculation scheme, line of influence, search for solutions.

ОПТИМІЗАЦІЯ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Медвідь І. І.¹, Отрош Ю. А.², Рашкевич Н. В.²

¹*Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля*

²*Національний університет цивільного захисту України*

Анотація. У теорії розрахунку будівельних конструкцій відбувається постійне уточнення фактичної роботи цих конструкцій, тобто створюються такі розрахункові схеми, які найточніше відповідають реальним умовам експлуатації. Створення оптимальних конструкцій є дуже актуальним завданням перед конструкторами. Тому цілком закономірно спробувати вирішити це завдання методами математичного програмування, які передбачають: вибір залежних і незалежних змінних, побудова математичних моделей та встановлення критеріїв ефективності обраної моделі. У цьому випадку модель повинна являти собою функцію, що досить точно описується проведені дослідження з використанням математичного апарату (різного роду функцій, рівнянь, систем рівнянь і нерівностей і т. д.). У математичному програмуванні будь-який набір незалежних (керованих) змінних називається рішенням. Оптимальними рішеннями вважаються ті, які з тих чи інших причин краще інших. Перевага (ефективність) дослідження кількісно оцінюється величиною чисельного значення цільової функції. "Пошук рішення" - надбудова для Microsoft Excel, яка використовується для вирішення задач оптимізації. За допомогою надбудови "Пошук рішення" можна визначити максимальне або мінімальне значення одного осередку, змінюючи інші осередки. Найчастіше ця надбудова використовується для пошуку оптимальних розв'язків задач економічно. У відкритому доступі недостатньо результатів використання цього підходу до розрахунку будівельних конструкцій.



Тому цілком логічно спробувати використати цю надбудову в задачах оптимізації будівельних конструкцій. У цій роботі зроблено спробу використовувати методи математичного програмування і цю надбудову для оптимізації геометричних розмірів конструкції, коли критерієм оптимізації було обрано чисельне значення згинального моменту в конкретному перерізі.

Ключові слова: розрахункова схема, лінія впливу, пошук рішень.

1 INTRODUCTION

In the field of the theory of calculation of building structures, there is a constant refinement of the actual operation of these structures, i.e. design schemes are created that most accurately correspond to actual operating conditions. Creating optimal structures is a very urgent task facing designers. Therefore, it is quite natural to try to solve this problem using mathematical programming methods, which involve: selecting dependent and independent variables, constructing mathematical models and establishing criteria for the effectiveness of the selected model. In this case, the model should be a function that fairly accurately describes the research being carried out using mathematical apparatus (various types of functions, equations, systems of equations and inequalities, etc.). Drawing up a mathematical research model requires the researcher to have a deep understanding of the essence of the phenomenon being described and knowledge of the mathematical apparatus [1].

Among the existing models, first of all, a large class of optimization models should be noted. In this case, the optimization problem can be formulated as follows: find values of the controlled variables that satisfy the system of inequalities (constraints) and turn the objective function into a maximum (or minimum). If the objective function is linear, and the variables in the constraint system are also linear, then such a problem is a linear programming problem. Of all the known methods of mathematical programming, the most widespread and developed is linear programming [2, 3]. In addition, nonlinear objective functions can be successfully used.

Solver is a Microsoft Excel add-in that can be used to solve optimization problems. Simply put, with this add-in you can determine the maximum or minimum value in one of the cells by changing the numerical values of other cells. Most often, this add-on is used to optimize economic problems. There are not enough results of using this approach for calculating building structures in the public domain. Therefore, it is quite logical to try to use this add-on in problems of optimization of building structures. In this work, an attempt was made to use mathematical programming methods and this add-on to optimize the geometric dimensions of the structure, when the numerical value of the bending moment in a specific section was chosen as an optimization criterion.

2 ANALYSIS OF PUBLICATIONS

In the open access, there are not enough results of using mathematical programming at individual stages of calculations for strength, rigidity and stability. Therefore, it is quite logical to try to use the "Search for Solutions" add-on in the problems of optimizing the calculations of building structures. [4, 5, 6, 7].

3 MATERIALS AND METHODS

This article attempts to show the feasibility of using the methods of mathematical programming and the "Search for Solutions" add-on at the stage of choosing the optimal parameters of the design scheme of a structure.

4 RESEARCH RESULTS

Based on the results obtained in [6], we will show how else it is possible to optimize the main geometric parameters of the design scheme. In contrast to the previously considered problem [7], the geometric dimensions are set by the controlled variables l_1, \dots, l_6 :

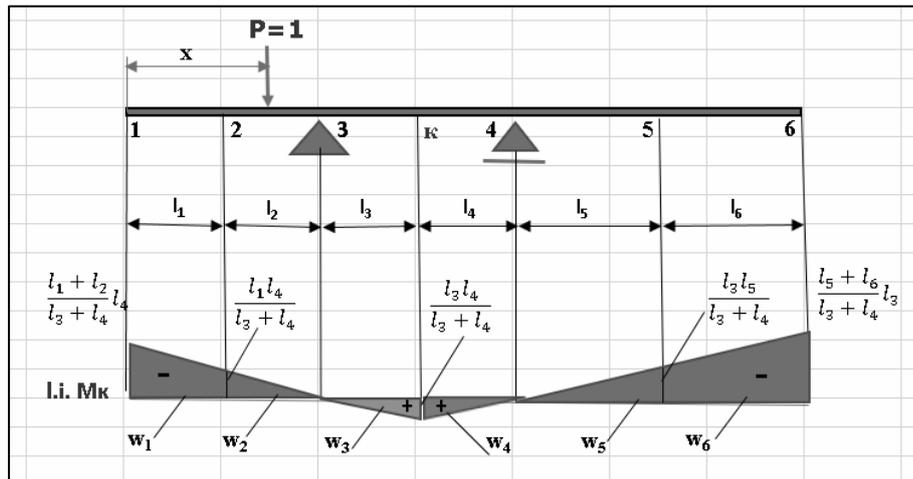


Fig. 1. Calculation scheme and the line of influence of the bending moment

To illustrate the idea of the proposed approach, a simple statically determinate beam on two supports was deliberately chosen (Fig. 1). This is done so that the idea of the proposed approach is not lost due to the complexity and cumbersomeness of the calculations.

From the proposed loading options, we choose, for example, the one that corresponds to the smallest bending moment in the “k” section [6]:

q1	q2	q3	q4	q5	P1	P2	P3	P4
30	20	0	0	30	100	50	150	0

Fig. 2. Numerical values of the external load corresponding to $M_{k \min}$

In the course of structural mechanics, a formula is known for determining the numerical value of the generalized internal force factor F along the corresponding line of influence [8, 9, 10]:

$$F = \sum q_i w_i + \sum P_i y_i + \sum M_i \tan \alpha_i \quad (1)$$

In our case, formula (1) will look like:

$$M_k = q_1(w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 + w_6) + q_2(w_1 + w_2) + q_5 w_5 + P_1 y_1 + P_2 y_2 + P_3 y_3 \quad (2)$$

Let us determine the areas of the corresponding sections and the ordinates of the line of influence:

$$w_1 = -\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{l_1 + l_2}{l_3 + l_4} \right) \cdot l_4 + \frac{l_1 \cdot l_4}{(l_3 + l_4)} \cdot l_1 \quad w_2 = -\frac{1}{2} \cdot \frac{l_1 \cdot l_4 \cdot l_2}{(l_3 + l_4)}$$

$$w_3 = \frac{1}{2} \cdot \frac{l_3 \cdot l_4 \cdot l_3}{(l_3 + l_4)} \quad w_4 = \frac{1}{2} \cdot \frac{l_3 \cdot l_4 \cdot l_4}{(l_3 + l_4)}$$

$$w_5 = -\frac{1}{2} \cdot \frac{l_3 \cdot l_5 \cdot l_5}{(l_3 + l_4)} \quad w_6 = -\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{l_3 \cdot l_5}{(l_3 + l_4)} + \frac{(l_5 + l_6) \cdot l_3}{(l_3 + l_4)} \right) \cdot l_6$$

$$y_1 = -\frac{l_3 \cdot l_5}{(l_3 + l_4)} \quad y_2 = -\frac{l_1 \cdot l_4}{(l_3 + l_4)} \quad y_3 = \frac{l_3 \cdot l_4}{(l_3 + l_4)}$$

In further calculations, we will assume that the bending moment is positive if it stretches the lower fibers.

Now let's introduce restrictions on the controlled variables l_1, \dots, l_6 . Constraints define

the conditions that these variables must satisfy. The type of restrictions is determined by the conditions of a particular task and the goal to be achieved.

Let us introduce, for example, the following restrictions:

$$\begin{cases} l_1, \dots, l_6 \geq 1 \\ l_1 + \dots + l_6 = 7 \\ l_3 = l_4 \end{cases}$$

In this case, the solution search parameters table will have the form shown in Fig. 3.

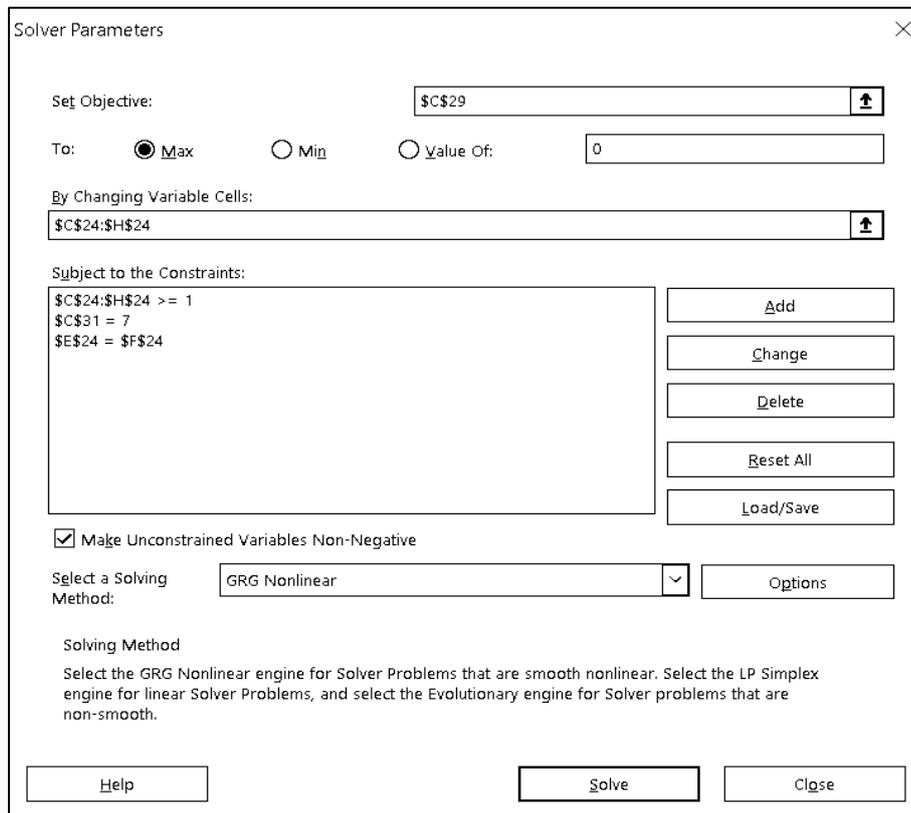


Fig. 3. Solution search parameters

The calculation results are shown in Fig. 4:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
22													
23			l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6					
24		I	1	1	1.500001	1.5	1	1					
25		w,y	-0.875	-1	0.5625	0.5625	-0.25	-0.5	-0.5	0.75	1		
26		q,P	30	20	0	0	30	100	50	150	0		
27													
28													
29			-16.25		Target function								
30													
31			7		$l_1 + \dots + l_6$								
32													

Fig. 4. Numerical values of controlled variables and objective function

The value of the objective function corresponds to the value of the maximum bending moment in the section "k" ($M_k = -16.25$ kNm). Since the value is negative, the top fibers of the cross section will be stretched. If the results of the calculation are presented graphically, then we obtain the calculation scheme shown in Fig. 5.

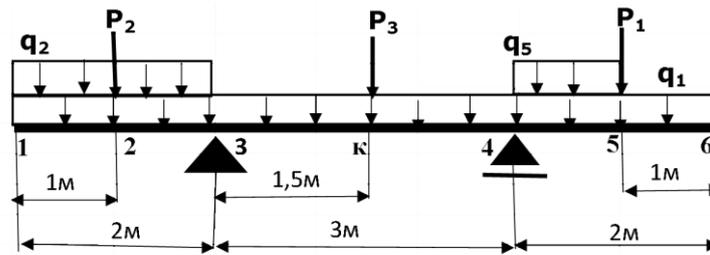


Fig. 5. Calculation scheme corresponding to $M_{k,max}$

Similarly, the geometric parameters of the design scheme are determined, at which the bending moment in the section "k" will be minimal (Fig. 6).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
22													
23			l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6					
24		l	1.9999999	1	1.0000001	1	1	1					
25		w,y	-3.5	-3	0.25	0.25	-0.25	-0.5	-1	0.5	1		
26		q,P	30	20	0	0	30	100	50	150	0		
27													
28													
29			-197.5										
30													
31													
32													

Fig. 6. Numerical values of controlled variables and objective function

If the results of the calculation are presented graphically, then we obtain the calculation scheme shown in Fig. 7.

The obtained value differs from $M_{k,min}$ in [6] because the controlled parameters l_i provide more details of the calculation scheme than the parameters a, b, c.

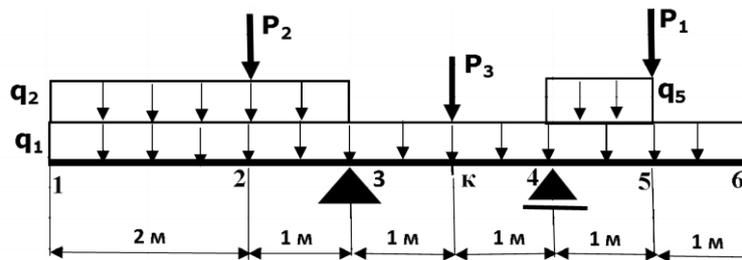


Fig. 7. Calculation scheme corresponding to $M_{k,min}$

If restrictions are added to the solution search parameters table

$$\begin{cases} (l_5 + l_6) \geq (l_1 + l_2) \\ l_1 = l_2 \\ l_5 = l_6 \end{cases},$$

then we obtain the same result as in [7].

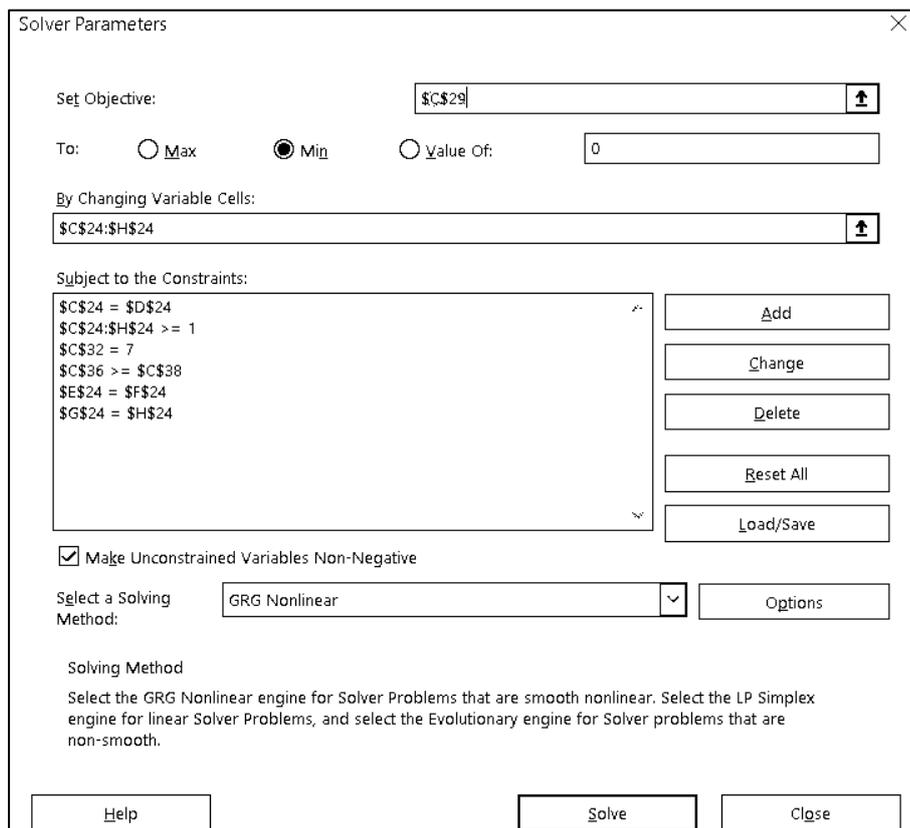


Fig. 8. Solution search parameters

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
22													
23			l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6					
24		l	1.25	1.25	1	1	1.25	1.25					
25		w,y	-2.625	-1.5625	0.25	0.25	-0.39063	-0.625	-0.625	0.5	1.25		
26		q,P	30	20	0	0	30	100	50	150	0		
27													
28													
29			-140.469										
30													
31													
32			7										
33													
34													
35													
36			2.5										
37													
38			2.5										
39													

Fig. 9. Numerical values of controlled variables and objective function

5 CONCLUSIONS

Thus, this article shows:

- the possibility and expediency of using the "search for solutions" at the stage of choosing the optimal parameters of the design scheme of the structure;
- sensitivity of calculation results to restrictions on controlled variables.

After the design scheme is defined, for its complete calculation, more powerful conventional means of calculating building structures can be involved.

6 GRATITUDES

We would like to express our gratitude to the National University of Civil Defence of Ukraine for supporting this research.

7 ETHICAL DECLARATIONS

The authors have no relevant financial or non-financial interests to report.

References

1. Kremer, M. Sh. (1999). Operations research in economics. Textbook. M.: Marketing
2. Karmanov, V. G. (1986). Matematicheskoye programmirovaniye [Mathematical programming]. M.: Nauka. [in Russian]
3. Romanyuk, T. P. Tereshchenko, T. O. Prisenko, G. V. Gorodkova, I. M. (1996). Matematichne programuvannya: Navch. posibnik [Mathematical programming: Educational manual]. K.: IZMN. [in Ukrainian].
4. Medved, I. I. (2021). Optimizatsiya raschetnykh skhem [Optimization of design schemes]. Modern building structures made of metal and wood. 25. 85–91. [in Russian]
5. Medved, I., Surianinov, M., Otrosh, Y., Pirohov O. (2021). Optimization of the calculated scheme. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 1164. 012051
6. Medved, I., Biloshytskiy, M., Maiboroda, R., Shcholokov, E., Tryhub V. (2022). "Search for solutions" in the problems of calculation of building structures. Mechanics and mathematical methods. 4. 2. 75–82.
7. I. Medved, Yu. Otrosh, N. Rashkevich, A. Kondratiev. (2023). Optimization of calculations of building structures. Mechanics and mathematical methods. 5. 1. 6–13.
8. Smirnov, A. F., Aleksandrov, A. V., Laschennikov, B. Ya., Shaposhnikov, N. N. (1981). Stroitel'naya mekhanika. Sterzhnevyye sistemy [Structural mechanics. Rod systems]. M.: Stroyizdat. [in Russian]
9. Smirnov, A. F., Aleksandrov, A. V., Laschennikov, B. Ya., Shaposhnikov, N. N. (1984). Stroitel'naya mekhanika [Structural mechanics]. M.: Stroyizdat. [in Russian]
10. Darkov, A. V., Shaposhnikov, N. N. (1986). Stroitel'naya mekhanika [Structural mechanics]. M.: Higher. shk. [in Russian]

Література

1. Kremer, M. Sh. Operations research in economics. Textbook. M.: Marketing, 1999. 270 p.
2. Карманов В. Г.. Математическое программирование. М: Наука, 1986. 288 с.
3. Романюк Т. П., Терещенко Т. О., Присенко Г. В., Городкова І. М. Математичне програмування: Навч. посібник. К.: ІЗМН, 1996. 312 с.
4. Медведь И. И. Оптимизация расчетных схем. Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини, 2021. №25. С. 85–91.
5. Medved, I., Surianinov, M., Otrosh, Y., Pirohov O. (2021). Optimization of the calculated scheme. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 1164. 012051
6. Medved, I., Biloshytskiy, M., Maiboroda, R., Shcholokov, E., Tryhub V. (2022). "Search for solutions" in the problems of calculation of building structures. Mechanics and mathematical methods. 4. 2. 75–82.
7. 7, I. Medved, Yu. Otrosh, N. Rashkevich, A. Kondratiev. (2023). Optimization of calculations of building structures. Mechanics and mathematical methods. 5. 1. 6–13.
8. Смирнов А. Ф., Александров А. В., Лащенко Б. Я., Шапошников Н. Н. Строительная механика. Стержневые системы. М.: Стройиздат, 1981. 512 с.
9. Смирнов А. Ф., Александров А. В., Лащенко Б. Я., Шапошников Н. Н. Строительная механика. М.: Стройиздат, 1984. 415 с.
10. Дарков А.В., Шапошников Н.Н. Строительная механика. М.: Высшая школа, 1986. 607 с.

Ivan Medved

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University,
PhD, Associate Professor
Central Avenue, 59-a, Severodonetsk, Ukraine, 93400
iw.medwed@gmail.com
ORCID: 0000-0001-9988-9900

Yurii Otrosh

National University of Civil Defence of Ukraine,
Doctor of Technical Sciences, Professor
Chernyshevska str., 94, Kharkiv, Ukraine, 61023
yuriyotrosh@gmail.com
ORCID: [http:// orcid.org/0000-0003-0698-2888](http://orcid.org/0000-0003-0698-2888)

Nina Rashkevich

National University of Civil Defence of Ukraine,
PhD, Lecturer of the Department
Chernyshevska str., 94, Kharkiv, Ukraine, 61023
nine291085@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5124-6068>

For references:

I. Medved, Yu. Otrosh, N. Rashkevich. (2024). Optimization of building artuctures. Mechanics and Mathematical methods. 6 (1). 17–25.

Для посилань:

Медвідь І. І., Отрош Ю. А., Рашкевич Н. В. Оптимізація будівельних конструкцій. Механіка та математичні методи, 2024. Т. 6. № 1. С. 17–25.

UDK 691: 699.4.621.001.63

MODELING THE ACOUSTIC FIELD BASED ON SOUND DISPERERSION DURING REFLECTIONS OF WAVE TRACING IN OPEN AREAS

A. Bespalova¹, A. Knysh¹, O. Dashkovska¹, O. Faizulyna¹, T. Chumachenko²

¹Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

²Odessa University "Odessa Polytechnic"

Abstract. A method of numerical modeling of acoustic fields in open areas with the possibility of parallelization of calculations is proposed. This method is part of a developed software solution that allows you to perform physical field modeling in various subject areas, being scalable in the sense of using an arbitrary set of parallel calculators. The use of existing modeling systems is associated with great difficulties in solving complex problems with a high degree of detail of the simulated object. Greater accuracy implies a high degree of discretization, a greater number of elementary model calculations performed. Parallel and distributed computing systems have a much better ratio of accuracy-approximation and time and cost costs compared to single-processor systems. Modern general purpose modeling systems use a simplified ray model of sound propagation, which neglects diffractive and interference effects, which are often critical in industrial acoustics. The article proposed a method based on the approximation of the principle of superposition of sound fields. It is accurate, while the linearity of the equations of acoustics is relevant. The basis is the Rayleigh integral and the approximation of reflective surfaces by flat point radiators. A parallel form of such a method is presented, as well as an analysis of its properties, both in sequential and parallel forms.

Key words: parallel calculations, computer modeling, industrial acoustics, Rayleigh integral, software complex, high performance computing

МОДЕЛЮВАННЯ АКУСТИЧНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВІ ДИСПЕРСІЇ ЗВУКУ ПРИ ВІДБИТТІ ТРАСУЮЧИХ ХВИЛЬ НА ВІДКРИТИХ МАЙДАНЧИКАХ

Беспалова А. В.¹, Книш О. І.¹, Дашковська О. П.¹, Файзуліна О. А.¹,
Чумаченко Т. В.²

¹Одеська державна академія будівництва та архітектури

²Одеський національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. Запропоновано метод чисельного моделювання акустичних полів на відкритих майданчиках з можливістю розпаралелювання обчислень. Даний метод є частиною розробленого програмного рішення, яке дозволяє виконувати моделювання фізичних полів в різних предметних областях, будучи масштабованим в сенсі використання довільного набору паралельних обчислювачів. Використання існуючих систем моделювання пов'язано з великими труднощами при вирішенні складних завдань з високим ступенем деталізації модельованого об'єкта. Велика точність має на увазі високу ступінь дискретизації, більшу кількість виконуваних елементарних модельних обчислень. Паралельні та розподілені обчислювальні системи мають набагато краще співвідношення точності наближення та часових та фінансових витрат порівняно з однопроцесорними системами. Сучасні системи моделювання загального призначення використовують спрощену променеву модель поширення звуку, яка нехтує ефектами дифракції та інтерференції, які часто мають вирішальне значення в промисловій акустиці.

У статті запропоновано метод, заснований на апроксимації принципу суперпозиції



звукових полів. Він точний, при цьому актуальна лінійність рівнянь акустики. В основі лежить Інтеграл Релея і апроксимація поверхонь, що відбивають плоскими точковими випромінювачами. Представлена паралельна форма такого методу, а також аналіз його властивостей, як в послідовній, так і в паралельній формах.

Ключові слова: паралельні обчислення, комп'ютерне моделювання, промислова акустика, Інтеграл Релея, програмний комплекс, високопродуктивні обчислення.

1 INTRODUCTION

When using computer modeling methods, the adequacy of the model is determined by the number of elementary model calculations performed that make up the experiment, by the number of approximating discrete components. At the same time, the time and cost costs associated with conducting a model experiment increase. The time and spatial cost functions depend on the model specification. Model calculations with high requirements for the accuracy of the results require high computing power, which is provided by computers. Another problem is the narrowness of the problems solved by the modeling system and the high cost of conducting complex studies in subject areas. Existing simulation systems do not adapt well to different classes of simulation tasks. An example is the ScilabFE package Scilab, which has a computing core to which plug-ins are connected that are intended to solve certain model tasks. Another approach is to integrate heterogeneous simulation systems that implement adjustable external system interfaces. The cost of such a composition will be high. When implementing complex computer simulation systems, the problem of high complexity can be circumvented. restrictions are introduced for the tasks to be solved: the use of simplified external conditions, strict restrictions on the set of permissible input parameter values; a task with low complexity of the physical process model. Today, there are no powerful simulation systems that offer scalability to heterogeneous parallel computers. There are conceptual approaches: parallel modeling of discrete events. There are also professional solutions that implement these approaches. High-performance software and hardware solutions are not portable and are implemented with close ties to model-specific tasks, mechanized systems and compilers. Therefore, most often they are created for a specific use in a particular production activity. The aim of this study is to propose a model for the distribution of sound in open space, which makes it possible to take into account the scattering of sound during reflections with the required accuracy. A conceptualization of the algorithm based on this model with scalable calculations has been proposed.

2 LITERATURE REVIEW

Despite the large number of proposals, mathematical models reflecting the structural and functional organization of the systems under study are widely used, built on the basis of queuing theory models, the analysis of which can be carried out by analytical, numerical and statistical methods. Probabilistic methods of queuing theory are used as analytical methods, methods of the theory of Markov random processes are used as numerical methods, and simulation methods are used as statistical methods.

In [1], the author proposed a systematization of methods for analyzing experimental data based on the theory of queuing, the theory of Markov random processes, and simulation modeling methods. Methods of optimization of highly parallel computations without specifying a block diagram are considered in the first approximation.

General concepts and concepts from the field of distributed computing are considered in [2]. Methods and algorithms for solving the most important tasks are given for the asynchronous distributed systems model. Attention is paid to the logic clock mechanism, which makes it possible to significantly simplify the development of algorithms for distributed systems. The main distributed algorithms of mutual exclusion are considered to ensure the security properties and survivability of distributed algorithms. Account performance issues are not affected.

In [3], an algorithm for numerical simulation of acoustic fields in a room with the possibility of parallelization of calculations is proposed. This algorithm is part of a software solution being developed that allows modeling of physical fields in various subject areas,

being scalable in the direction of an arbitrary set of parallel calculators. The use of a modeling system is associated with great difficulties in solving complex problems with a high degree of detail of the simulated object. High accuracy implies a high degree of sampling and the calculation of open acoustic fields is not provided.

In [4] Requirements-based testing is emphasized in acoustic certification documents because this strategy has been found to be the most effective at revealing errors. This paper describes the unified requirements-based approach to the creation of conformance test acoustic for mission-critical systems. The approach uses formal machine-readable specifications of requirements and finite state machine model for test sequences generation on-the-fly. Possible application of the presented approach to various areas of acoustic embedded systems testing is discussed. Only for close barrier interior clearly.

This [6] article is about of intended to serve as an introduction on modeling room geometries in software, to the facilities in the software and to the calculation principles applied in software. It will not cover in depth all facilities included in the software; explanations of displays, calculation parameters, results, etc. are available as context sensitive help from within the software applications . Only for acoustic fields with close modeling source.

This [10] article is about of intended to serve as an introduction on modeling room geometries in software, to the facilities in the software and to the calculation principles applied in software. It will not cover in depth all facilities included in the software; explanations of displays, calculation parameters, results, etc. are available as context sensitive help from within the software applications . Only for vibrations process with close modeling source.

It can be concluded that today there are no high-performance general-purpose modeling systems that provide scalability to heterogeneous parallel computers.

3 PURPOSE AND OBJECTIVES OF THE RESEARCH

In this paper, a mathematical simulation of sound propagation in an open space has been carried out, which would allow taking into account sound scattering during reflections with the necessary accuracy. Thus, it is possible to create a database of preferred operating modes and experimentally refine the mathematical model point-by-point.

To achieve the goal of the work, it is necessary to solve the following tasks:

1. To propose a conceptualization of the algorithm taking into account the requirements of scalability of calculations.
2. Consider the applicability of an arbitrary number of parallel calculators with a proportional reduction in the time spent on execution.
3. Determine the shape of the acoustic field simulation, determine the number of acoustic rays acting in the active and reactive phases, and the magnitude of the total reflected sound beam.
5. Develop a block diagram of the algorithm for calculating the geometric similarity of the sound field using an acoustic camera.
6. To test the block diagram of the algorithm for calculating the geometric similarity of the sound field in a pilot environment using a quadcopter.

4 RESEARCH RESULTS

Most modern software systems that simulate acoustic fields use a simplified radial model of sound propagation. In this model, one fall the common beam produces one reflected light. This model performs well over long distances in the far zone of the source or

at high frequencies, when geometrical is permissible when proximity. However, in limited open spaces at low and medium frequencies, the wave effects are too large to ignore.

The basis of the presented model is the method of Rayleigh calculation of flat emitters. Rayleigh integral has the following form [10]:

$$\varphi(M) = \frac{1}{2\pi} \iint_{\sigma} \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} \cdot \frac{e^{-ikr_2}}{r_2} d\sigma, \quad (1)$$

where: $\frac{\partial \varphi_1}{\partial n}$ – the normal component of the oscillatory velocity; r_2 – the distance to the observation point M ; σ – surface of the ground on which the integration is carried out; $d\sigma$ – elementary platform.

Integral the expression in (1) is a classical point formula source. Thus, the Rayleigh method is a discretization of the radiator into infinitely small elements — point sources and the subsequent addition of their fields at the calculated point of space.

Let us now consider not the radiation of sound by a single emitter, where $(\partial \varphi_1) / \partial n$ is constant over the entire surface of the mechanized means, but the re-reflection (Fig. 1). The front of the emitted wave leads non-simultaneously to the same-height areas of the over-isobar surfaces. There is a phase shift of the normal component of the velocity of different elements $d\sigma$.

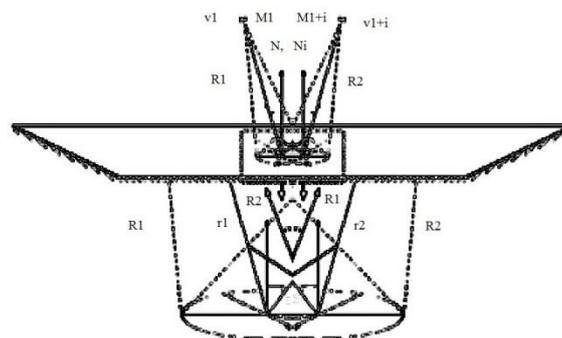


Fig. 1. Model of reflection of sound from the dirt canvas

As a primary source, take a point source with a unit amplitude.

The field of its radiation is described by the formula:

$$\varphi_1 = \frac{e^{-i(\omega\tau - kr_1)}}{r_1} \quad (2)$$

where, r_1 – the distance to the reflecting surface.

Differentiating (2) by n :

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = (\text{grad} \varphi_1, n) = -ik \frac{e^{-i(\omega\tau - kr_1)}}{r_1} \cos(r_1, n), \quad (3)$$

To calculate the distances, we use the cosine theorem (Fig. 2):

$$r^2 = R^2 + \rho^2 - 2 \cdot R \cdot \rho \cdot \cos(\gamma), \quad (4)$$

where, $\cos \gamma = \sin \theta \cdot \cos \varphi$, $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$

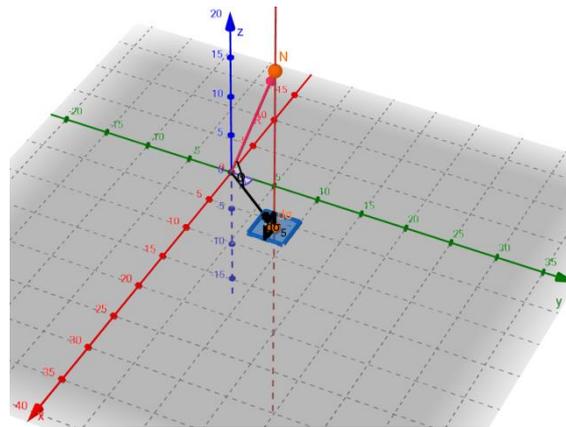


Fig 2. To the calculation of geometric similarity

From (4) we obtain:

$$r^1 = \sqrt{R^2 + \rho^2 - 2 \cdot R \cdot \rho \cdot \sin \theta \cdot \cos \left(\varphi - 1/\tan\left(\frac{y}{x}\right) \right)}, \quad (5)$$

$$\cos(r_i, n) = \cos(\pi - \theta_1), \quad (6)$$

Substituting (3), (5) and (6) into (1) we obtain:

$$\varphi(M) = \frac{-ik}{2\pi} \iint_{\sigma}^N v \cdot \frac{e^{i\left(\omega\tau - k\sqrt{R_1^2 + \rho^2 - 2 \cdot R_1 \cdot \rho \cdot \sin \theta_1 \cdot \cos\left(\varphi_1 - 1/\tan\left(\frac{y}{x}\right)\right)}\right)}}{\sqrt{R_1^2 + \rho^2 - 2 \cdot R_1 \cdot \rho \cdot \sin \theta_1 \cdot \cos\left(\varphi_1 - \frac{1}{\tan\left(\frac{y}{x}\right)}\right)}} \cdot \frac{e^{-ik\left(\omega\tau - k\sqrt{R_2^2 + \rho^2 - 2 \cdot R_2 \cdot \rho \cdot \sin \theta_2 \cdot \cos\left(\varphi_2 - 1/\tan\left(\frac{y}{x}\right)\right)}\right)}}{\sqrt{R_2^2 + \rho^2 - 2 \cdot R_2 \cdot \rho \cdot \sin \theta_2 \cdot \cos\left(\varphi_2 - 1/\tan\left(\frac{y}{x}\right)\right)}} dx dy, \quad (7)$$

Thus, an analytical dependence of the velocity potentials on the reflection angles is obtained. θ_1 , φ_1 and distances to quadcopter reference platform positioning R_1 , viewing angles θ_2 , φ_2 and distances to quadcopter on positioning work platforms R_2 , the shape and size of the radiation source of the audio signal. The reflection coefficient v is generally a complex value:

$$v = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (8)$$

where Z_1 , Z_2 - acoustic impedances of gaseous and solid media.

$$Z = R + i \cdot X, \quad (9)$$

where, R and X – respectively active and reactive acoustic impedances. However, if we consider a small element σ , then the spherical wave it radiates up to the source λ (Fig. 1) can be approximated approximately by a plane wave. Thus, the radiation resistance will be purely active [9].

This approximation is the more accurate, the smaller the element σ and the farther it is from the source. Then:

$$v = \frac{\rho_2 \cdot c_2 - \rho_1 \cdot c_1}{\rho_2 \cdot c_2 + \rho_1 \cdot c_1}, \quad (10)$$

where, ρ - the density of the medium; c - the speed of sound in the medium.

To test the adequacy of formula (7), a sound field was simulated in the COMSOL Acoustic environment. The model of a virtual experiment is shown in Fig. 3. The model includes the source, the reflecting plate Ref and the output plane of the result Reg. The reflector size is 2x2 m, the registration plane is 40x40 m. The distance between Reg and Ref is 14 m. The coordinates of the isotropic source are: $x = 2$ m, $y = 2$ m, $z = 2$ m. The simulation was performed at a frequency of 1000 Hz.

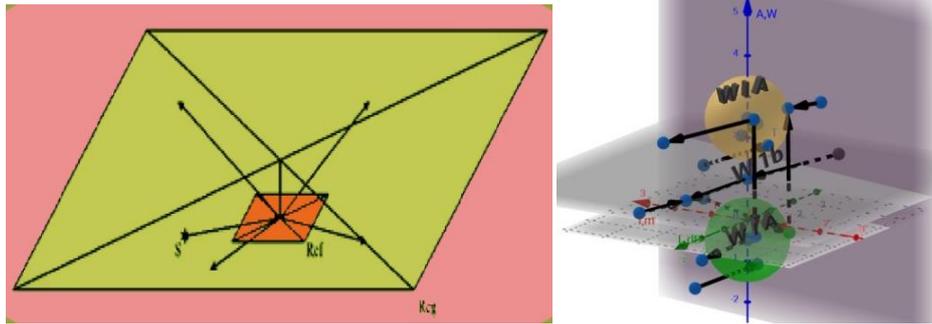


Fig. 3. COMSOL Acoustic virtual experiment model

The simulation results are shown in Fig. 4, from which it follows that the intensity maximum is in the coordinates $x = -4$, $y = -4$, which fully satisfies the geometrical acoustics. However, it is obvious that the maximum is distributed over a fairly large area, which indicates the wave nature of reflection. Thus, at 1000 Hz, significant diffraction effects are visible, due to the presence of a Reg reflector in the near zone.



Fig. 4. The intensity distribution of sound pressure on the isobar Reg

5 DISCUSSION OF RESEARCH RESULTS

It should be noted that the algorithm does not directly use formula (7), but only its integrand. The construction site is set by the user in the form of a set of polygons, which approximate all surfaces that are essential for the model. Polygons, in turn, are discretized to a set of points and the surrounding areas σ . Each such element becomes an elementary point radiator radiating into a half-space.

A large degree of discretization will give the best results, on the other hand, the number of discrete emitters directly affects the performance of the algorithm. In COMSOL, many simulations were performed at different frequencies with different sizes of elementary emitters. Comparison of the results is shown in Fig. 5. The error was considered to be a relatively high degree of discretization with an element size of about 10° . The graph in Fig. 5 illustrates that the optimal size of an elementary radiator must not exceed the wavelength of the calculated octave. When this value is exceeded, the accuracy drops sharply.

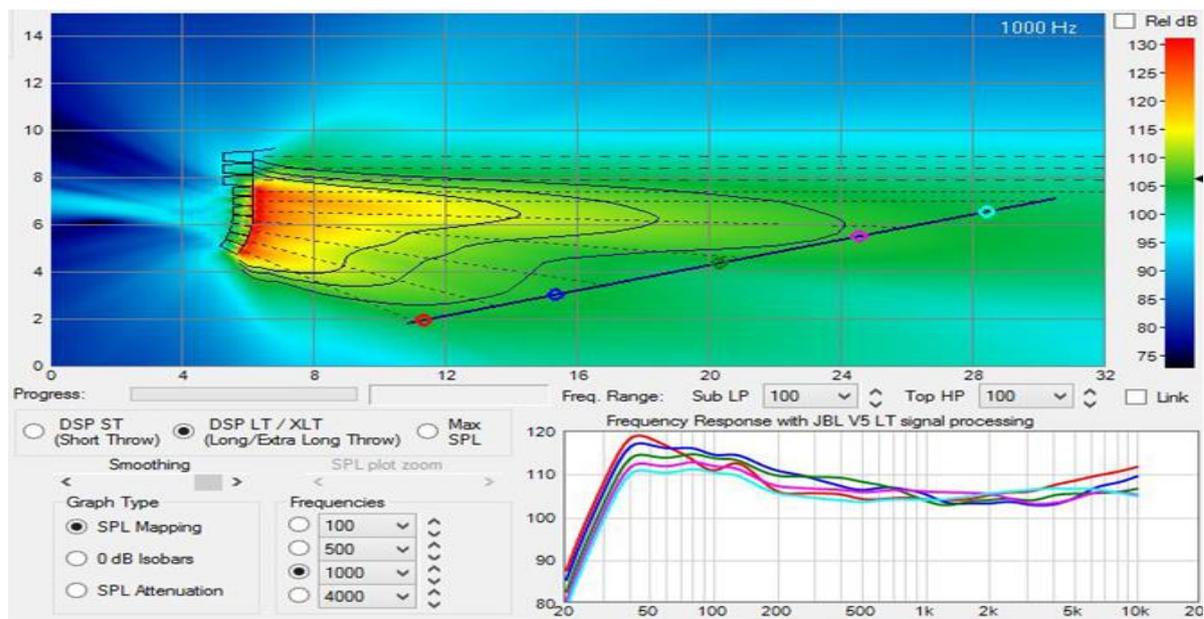


Fig. 5. Choosing the optimal reverberation size of the elementary polygon

6 CONCLUSIONS

Today, parallel and distributed computing is becoming increasingly popular and widespread, as the dimensions of a logical element approach the lower theoretically possible boundaries due to quantum effects and energy costs. Therefore, already at the stage of developing algorithms for solving any problem, subject matter experts and programmers need to ensure the parallelism of algorithms taking into account the requirements and constraints arising from the architecture of the software and hardware platform used.

This paper presents a model of the propagation of the acoustic field in open and combined spaces, which can reflect the diffraction properties during the propagation and reflection of sound. Based on the model, an algorithm can be compiled for further implementation in a formal language.

7 GRATITUDES

Thank you for the help in conducting the experiments of the Deputy Head of Technical Affairs and development of the Black Sea branch State Enterprise "Administration of Sea Ports of Ukraine", Ass.prof. Vitaly Lipskyi.

8 ETHICAL DECLARATIONS

The authors have no relevant financial or non-financial interests in the activities of the port of Chornomorsk. The information was provided by agreement of the parties for the scientific support of engineering solutions, which were the purpose of the research.

Література

1. Алиев Т. И. Основы моделирования дискретных систем. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. 363 с.
2. Косяков М. С. Введение в распределенные вычисления. СПб.: НИУ ИТМО, 2014. 155 с.
3. Чусов А. А., Стаценко Л. Г. Разработка адаптируемых распределенных систем параллельного моделирования, анализа и визуализации физических полей: монография / Инженерная школа ДВФУ. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2014. 166 с.

4. A. Maksimov. Requirements-based conformance testing of ARINC 653 real-time operating systems. The Proceedings of the Data Systems In Aerospace conference (DASIA 2010), 2010
5. 1278.1-2012 IEEE Standard for Distributed Interactive Simulation – Application Protocols.
6. 1278.1-2012 IEEE Standard for Distributed Interactive Simulation – Application Protocols. 6. 1516-2010 IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA) – Framework and Rules
7. Agilent 85270 Electromagnetic Design System: Getting Started. Agilent Technologies Inc, Santa Clara, USA, 2006. 154 p.
8. Christensen C. L. Odeon Room Acoustics Software. Version 11. Industrial, auditorium and combined editions: user manual. Denmark, Odeon A/S Scion DTU, 2011. 157 p.
9. Moiola A., Hiptmair R., Perugia I. Plane wave approximation of homogeneous helmholtz solutions. Zeitschrift fur angewandte. Mathematik und Physik. 2011(62);5:809-837
10. Putra A. , Shyafina N., Thompson D., Muhammad N., Mohd Nor M.J., Nuawi Z. Modelling sound radiation from a baffled vibrating plate for different boundary conditions using an elementary source technique. 43rd Int. Congr. on Noise Control Engineering: INTERNOISE 2014, Melbourne; Australia; 16 November 2014, through 19 November 2014

References

1. Aliev T. I. Osnovy modelirovaniya diskretnykh sistem. SPb.: SPbGU ITMO, 2009. 363 s.
2. Kosyakov M. S. Vvedenie v raspredelennye vychisleniya. SPb.: NIU ITMO, 2014. 155 s.
3. Chusov A. A., Stacenko L. G. Razrabotka adaptiruemykh raspredelennykh sistem parallel'nogo modelirovaniya, analiza i vizualizacii fizicheskikh polej: monografiya / Inzhenernaya shkola DVFU. Vladivostok: Dal'nevost. federal. un-t, 2014. 166 s.
4. A. Maksimov. Requirements-based conformance testing of ARINC 653 real-time operating systems. The Proceedings of the Data Systems In Aerospace conference (DASIA 2010), 2010.
5. 1278.1-2012 IEEE Standard for Distributed Interactive Simulation – Application Protocols
6. 1278.1-2012 IEEE Standard for Distributed Interactive Simulation – Application Protocols. 6. 1516-2010 IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA) – Framework and Rules
7. Agilent 85270 Electromagnetic Design System: Getting Started. Agilent Technologies Inc, Santa Clara, USA, 2006. 154 p.
8. Christensen C. L. Odeon Room Acoustics Software. Version 11. Industrial, auditorium and combined editions: user manual. Denmark, Odeon A/S Scion DTU, 2011. 157 p.
9. Moiola A., Hiptmair R., Perugia I. Plane wave approximation of homogeneous helmholtz solutions. Zeitschrift fur angewandte. Mathematik und Physik. 2011(62);5:809-837
10. Putra A. , Shyafina N., Thompson D., Muhammad N., Mohd Nor M.J., Nuawi Z. Modelling sound radiation from a baffled vibrating plate for different boundary conditions using an elementary source technique. 43rd Int. Congr. on Noise Control Engineering: INTERNOISE 2014, Melbourne; Australia; 16 November 2014, through 19 November 2014

Alla Bespalova

Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture,
Doctor of Technical Sciences, Professor
Didrihsona str., 4, Odesa, Ukraine, 65029
bespalova.a.v.2015@gmail.com
ORCID: 0000-0003-3713-0610

Alexei Knysh

Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture,
Ph.D., Associate Professor
Didrihsona str., 4, Odesa, Ukraine, 65029
corttas72@outlook.com
ORCID: 0000-0002-3449-4112

Olga Dashkovska

Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture,
Ph.D., Associate Professor
Didrihsona str., 4, Odesa, Ukraine, 65029
dop.od@ukr.net
ORCID: 0000-0002-9980-023X

Oksana Faizulyna

Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture,
Ph.D., Associate Professor
Didrihsona str., 4, Odesa, Ukraine, 65029
narenko@ukr.net
ORCID: 0000-0002-1151-4467

Tatiana Chumachenko

Odesa University "Odessa Polytechnic",
Doctor of Technical Sciences, Professor
Shevchenko av., 1, Odessa, Ukraine, 65044
chumachenko-1981.28@ukr.net
ORCID: 0000-0001-6149-4786

For references:

A. Bepalova, A. Knysh, O. Dashkovska, O. Faizulina, T. Chumachenko. (2024). Modeling the acoustic field based on sound dispersion during reflections of wave tracing in open areas. *Mechanics and Mathematical Methods*. VI (1). 26–35.

Для посилань:

Беспалова А. В., Книш О. І., Дашковська О. П., Файзуліна О. А., Чумаченко Т. В. Моделювання акустичного поля на основі дисперсії звуку при відбитті трасуючих хвиль на відкритих майданчиках. *Механіка та математичні методи*, 2024. Т. VI. № 1. С. 26–35.

УДК 624. 042

МОДЕЛЮВАННЯ СТІЙКОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ ГРУНТ-ФУНДАМЕНТ-БУДІВЛЯ ПРИ ДІЇ СИЛОВИХ ТА ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ВПЛИВІВ

Пурденко Р. Р.¹, Отрош Ю. А.¹, Рашкевич Н. В.¹, Сур'янінов В. М.²

¹Національний університет цивільного захисту України

²Одеська державна академія будівництва та архітектури

Анотація. З огляду на великий потенціал використання підземного простору під забудову постає питання забезпечення стійкості та надійності системи ґрунт-фундамент-будівля для вчасного виявлення ознак руйнувань, осідань ґрунтів або втоми матеріалу конструкцій. Виконаний аналіз літературних джерел та поставлені завдання досліджень. Актуальною науково-технічною задачею є розробка чисельної моделі та методики комплексного розрахунку лавиноподібного обвалення будівель та споруд при пожежі та вибухах з врахуванням особливостей роботи ґрунтів та їх властивостей. У ході досліджень за допомогою програмного забезпечення «ЛІРА-САПР» розроблена чисельна модель та проведено чисельне моделювання чотирьох поверхової стоянки для автомобілів (паркінг) з врахуванням особливостей роботи ґрунтів та їх властивостей, яка в подальшому буде використана для моделювання лавиноподібного обвалення при пожежі (вибуху).

Для цього першим етапом були проведені роботи з побудови моделі чотирьох поверхової стоянки для автомобілів (паркінг): створення початкового проекту (визначення розмірів та характеристик будівлі, вибір потрібних параметрів для моделювання – висота, ширина, довжина, розташування входів та виходів, розміщення автомобілів); створення 3D моделі в програмі САПФІР 3D (використання інструментів для побудови будівлі: стіни, стеля, підлоги, сходи, ліфти тощо, додавання елементів паркінгу); встановлення параметрів моделі (вказання матеріалів для будівельних елементів, встановлення параметрів для обчислення навантажень); аналіз моделі та вирішення проблем (перевірка моделі на наявність помилок, корекція параметрів для досягнення оптимальних результатів); виконання обчислень та аналіз результатів; оформлення звіту та висновків.

Другим етапом проведена перевірка моделі в ПК «ЛІРА-САПР», побудований ґрунтовий масив в модулі ґрунт. Роботи включають в себе: імпорт моделі у «ЛІРА-САПР»; аналіз моделі на відповідність (перевірка геометрії та розмірів будівлі у ЛІРА-САПР, перевірка наявності необхідних елементів конструкції та їх параметрів); створення ґрунтового масиву (запуск модуля ґрунт у складі ЛІРА-САПР, вибір параметрів для побудови ґрунтового масиву – тип ґрунту, глибина, параметри навантаження тощо); побудова ґрунтового масиву (використання інструментів модуля ґрунт для побудови масиву ґрунту під будівлею, вказання параметрів глибини, рівнів, властивостей ґрунтів тощо); аналіз впливу ґрунтового масиву на конструкцію (проведення розрахунків для визначення впливу ґрунтового тиску на конструкцію будівлі, аналіз результатів інженерно-геологічних характеристик ґрунтового масиву на необхідність корекції конструкції будівлі); корекція моделі та повторний аналіз (внесення змін у модель будівлі або параметри ґрунтового масиву, повторний аналіз впливу ґрунтового масиву на конструкцію для визначення відповідних змін та корекцій).

Ключові слова: система ґрунт-фундамент-будівля, моделювання, стійкості та надійності будівлі, ПК ЛІРА-САПР, САПФІР 3D.

SIMULATION OF STABILITY AND RELIABILITY OF THE SOIL-FOUNDATION-BUILDING SYSTEM UNDER FORCE AND HIGH-TEMPERATURE INFLUENCES

R. Purdenko¹, Yu. Otrosh¹, N. Rashkevich¹, S. Suryaninov²

¹*National University of Civil Defence of Ukraine*

²*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*

Abstract. Given the great potential of using the underground space under construction, the question arises of ensuring the stability and reliability of the soil-foundation-building system for the timely detection of signs of destruction, soil subsidence or material fatigue of structures. The analysis of literary sources and the set research tasks were carried out. An urgent scientific and technical task is the development of a numerical model and methodology for the complex calculation of avalanche-like collapse of buildings and structures in the event of fire and explosions, taking into account the peculiarities of the operation of soils and their properties. In the course of research, a numerical model was developed with the help of LIRA-SAPR software and a numerical simulation of a four-story car park (parking lot) was carried out, taking into account the peculiarities of the operation of soils and their properties, which will later be used to simulate an avalanche-like collapse in the event of a fire (explosion).

For this, the first stage was the construction of a model of a four-story car park (parking lot): creating an initial project (determining the dimensions and characteristics of the building, choosing the necessary parameters for modeling - height, width, length, location of entrances and exits, placement of cars); creating a 3D model in the SAPPHERE 3D program (using tools to build a building: walls, ceiling, floors, stairs, elevators, etc., adding parking elements); setting model parameters (specifying materials for building elements, setting parameters for calculating loads); model analysis and problem solving (checking the model for errors, correcting parameters to achieve optimal results); performing calculations and analyzing the results; preparation of the report and conclusions.

In the second stage, the model was checked in the PC "LIRA-SAPR", the soil array was built in the soil module. Works include: import of the model to "LIRA-SAPR"; analysis of the model for compliance (checking the geometry and dimensions of the building in LIRA-CAD, checking the presence of the necessary structural elements and their parameters); creation of a soil massif (starting the soil module as part of LIRA-SAPR, selecting parameters for building a soil massif - soil type, depth, load parameters, etc.); construction of the soil massif (using the tools of the soil module to construct the soil massif under the building, specifying parameters of depth, levels, soil properties, etc.); analysis of the impact of the soil mass on the structure (calculations to determine the impact of soil pressure on the building structure, analysis of the results of the engineering and geological characteristics of the soil mass on the need for correction of the building structure); model correction and re-analysis (making changes to the building model or soil mass parameters, re-analysis of the influence of the soil mass on the structure to determine the appropriate changes and corrections).

Keywords: soil-foundation-building system, modeling, stability and reliability of the building, PC LIRA-CAD, SAPPHERE 3D.

1 ВСТУП

Ріст міського населення, постійний тиск на доступну основу, а також потреби в забезпеченні безпеки в умовах повномасштабного вторгнення рф створюють виклик у пошуках нових методів забудови. Використання підземного простору є стратегічною відповіддю на цей виклик, оскільки дозволяє ефективно використовувати простір у межах міста, не погіршуючи екологічну ситуацію та не впливаючи на вже існуючі земельні ресурси.

Використання підземного простору дозволяє зберегти природні ландшафти та зелені зони, історичні пам'ятки та архітектурні об'єкти.

Крім того, підземна забудова може бути більш стійкою до природних катастроф, що забезпечує безпеку для мешканців та майна. Може сприяти економії енергоресурсів, завдяки природній ізоляції, що зменшує споживання енергії на опалення та охолодження.

Також, слід звернути увагу на актуальність використання підземного простору під час війни. Підземні приміщення можуть служити як укриття для цивільного населення під час атак та бомбардувань. Бути використані як місця евакуації та надання медичної допомоги пораненим. Виконувати функції захисту важливих об'єктів і інфраструктури, таких як командні пункти, електростанції, водні джерела тощо від нападів агресора. Забезпечити стратегічну перевагу військам за рахунок розміщення військ і обладнання в безпечних умовах, що важливо під час проведення військових операцій. Підземні споруди можуть використовуватися для розміщення секретних об'єктів, військових баз, депо зброї та інших стратегічно важливих об'єктів, забезпечуючи їх таємницю та захист від розвідки противника.

З огляду на великий потенціал використання підземного простору під забудову при вирішенні сучасних міських викликів в умовах сьогодення, постає питання забезпечення стійкості та надійності системи ґрунт-фундамент-будівля для вчасного виявлення ознак руйнувань, осідань ґрунтів або втоми матеріалу конструкцій.

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Система ґрунт-фундамент-будівля в будівництві відіграє ключову роль у забезпеченні стійкості та надійності будівлі.

Фундамент виступає як опорна структура, яка передає вагу будівлі на ґрунт, розподіляючи навантаження рівномірно. Його розмір, форма та матеріал обираються залежно від ряду факторів, що залежать від характеристик ґрунту та величини навантаження будівлі. В умовах сьогодення ґрунти зазнають хімічного, фізичного та механічного впливу [1]. Фізичні та механічні параметри ґрунтів необхідно враховувати в комп'ютерних моделях.

Дослідником [2] детально розглянуті фактори, які впливають на вибір фундаменту, а саме: розташування та тип конструкції, величина та розподіл навантажень, умови ґрунту, доступ до будівельної техніки, вимоги до довговічності, вплив установки на прилеглі фундаменти, конструкції, людей, відносні витрати, місцеві будівельні практики. Дані фактори можуть бути враховані в наших наукових дослідженнях.

В роботі [3] за допомогою програмного забезпечення ABAQUS досліджені питання впливу розміру фундаменту на сейсмічність будівлі з урахуванням взаємодії ґрунт-фундамент-конструкція. Тривимірною чисельною моделлю враховувалася нелінійна поведінка ґрунтового середовища та структурних елементів. Для чисельної моделі були задані нескінченні граничні умови для моделювання меж вільного поля, а також розглянуті відповідні контактні елементи, здатні моделювати ковзання та поділ між елементами

фундаменту та ґрунту. Зроблено висновок, що розмір дрібнозаглибленого фундаменту впливає на динамічні характеристики та сейсмічну реакцію будівлі через взаємодію ґрунту, фундаменту та конструкції. В запропонованих дослідженнях пропонується використовувати ПК «ЛІРА САПР».

Глибина залягання фундаменту впливає на стійкість, надійність і довговічність будівлі в цілому, а також забезпечує захист від різних небезпечних факторів, таких як просідання, ерозія ґрунту та землетруси. В роботі [4] розроблена структурна модель, яка дозволяє комплексно оцінити фактори, що впливають на глибину закладення. Особливу увагу при проектуванні системи ґрунт-фундамент-конструкція варто приділити властивостям ґрунтів. Глибина залягання родючого та мінерального шарів, їх текучість, стійкість до опадів, стійкість до морозів – усі ці параметри можуть впливати на вибір типу фундаменту та способу його захисту.

Методи забезпечення стійкості можуть включати в себе застосування стійкіших будівельних матеріалів. В роботі [5] розглянуті питання стабілізації та модифікації ґрунтових умов за рахунок використання цементу.

Застосування геотекстилю розглянуто в роботах [6, 7], ґрунтових екранів в роботах [8, 9].

Для покращення міцності та стійкості фундаменту може використовуватися арматура, яка забезпечує додаткову підтримку конструкції [10, 11]. Утеплення фундаменту дозволяє запобігти замерзанню ґрунту та знижує ризик пошкодження під впливом морозів [11, 12].

Отже, система ґрунт-фундамент-будівля включає в себе комплексний підхід до вибору типу, конструкції та розташування фундаменту з урахуванням характеристик ґрунту, будівельних матеріалів та особливостей будівлі для забезпечення її стійкості та надійності. Всі ці аспекти потрібно враховувати під час моделювання, вибору ефективного методу забезпечення стійкості системи.

Поширеним методом моделювання взаємодії ефектів ґрунт-фундамент-конструкція проводиться за допомогою ряду пружних елементів - по одному на кожний ступінь свободи системи – коефіцієнти жорсткості та демпфування яких визначаються через еквівалентні пружини та демпфуючі елементи [13]. Однак, цей підхід може бути досить неточним, оскільки він не враховує можливий зв'язок між різними ступенями свободи та непружною реакцією, спричиненою пластичними деформаціями, які можуть розвиватися у ґрунті фундаменту навіть за відносно низьких рівнів навантаження.

Макроелементний підхід розглянутий у роботах [14, 15]. Підхід полягає в об'єднанні реакції системи фундамент-ґрунт в один обчислювальний вузол з використанням для її опису одного непружного рівняння, записаного в рамках узагальнених навантажень та переміщень. Це дозволяє досягти різкого зменшення ступенів свободи, зберігаючи при цьому здатність ефективно відтворювати нелінійний, незворотний і гістерезисний відгук фундаментів дрібного закладення, схильних до непропорційних, циклічних/динамічних умов навантаження.

Універсальним є підхід заснований на використанні методу кінцевих елементів для створення детальної моделі системи ґрунт-фундамент у «ближньому полі» – відповідній обмеженій ділянці ґрунту, обмеженій штучними межами – з використанням лінійної еластичності для моделювання реакції «далекого поля». У ближній зоні ґрунт може бути описаний або нелінійно-пружними, або повністю непружними моделями, здатними враховувати основні особливості реакції ґрунту в умовах циклічного/динамічного навантаження [16]. Основний недолік полягає у високих обчислювальних витратах, пов'язаних з дуже великою кількістю ступенів свободи, необхідні дискретизації об'єму ґрунту в ближньому полі, особливо в непружному режимі.

Незважаючи на те, що всі розрахункові програмні комплекси засновані на методі кінцевих елементів, у нормативній базі практично не існує рекомендацій щодо складання самої чисельної моделі ґрунтів та будівель, а також відсутні єдині рекомендації щодо вибору типів кінцевих елементів, які здатні забезпечити необхідну точність розрахунку чисельної моделі з урахуванням усіх основних чинників, що впливають на міцність та стійкість будівлі [17], а відповідно і ґрунтів.

Програмне забезпечення «ЛПРА-САПР» є перспективним інструментом проведення розрахунків та моделювання [18]. Для застосування даного інструменту актуальною науково-технічною задачею є розробка чисельних моделей та методик комплексного розрахунку лавиноподібного обвалення будівель та споруд при пожежі та вибухах з врахуванням особливостей роботи ґрунтів та їх властивостей.

3 ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є розробка чисельної моделі та проведення чисельного моделювання лавиноподібного обвалення будівель та споруд при пожежі та вибухах з врахуванням особливостей роботи ґрунтів та їх властивостей.

Для досягнення поставленої мети потребували вирішення наступні завдання:

- провести аналіз наукових праць щодо забезпеченні стійкості та надійності будівлі в системі ґрунт-фундамент-будівля;
- з метою дослідження стійкості будівлі до прогресуючого обвалення розробити чисельну модель за допомогою ПК «САПФІР 3Д» на прикладі чотирьох поверхової стоянки для автомобілів (паркінг) для подальшого аналізу в програмному забезпеченні «ЛПРА-САПР».

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Побудова чисельної моделі за допомогою «САПФІР 3Д» на прикладі чотирьох поверхової стоянки для автомобілів (паркінг).

Для побудови моделі потрібно:

1. Підготовка аналітичних моделей будівельних конструкцій для подальшого розрахунку на міцність та аналізу конструкції в програмному забезпеченні «ЛПРА-САПР».
2. Документування та отримання креслень.
3. Виготовлення проектної документації відповідно до вимог системи проектної документації для будівництва на стадіях від проектної пропозиції до робочої документації.

За допомогою «САПФІР 3Д» – модуля САПФІР генератор або за допомогою звичних елементів таких як стіна, балка, плита, віконний і дверний проріз, паля то що – створюємо модель для подальшого розрахунку на міцність, аналізу будівельних конструкцій та розрахунку на прогресуюче обвалення в ПК «ЛПРА-САПР» (рис. 1).

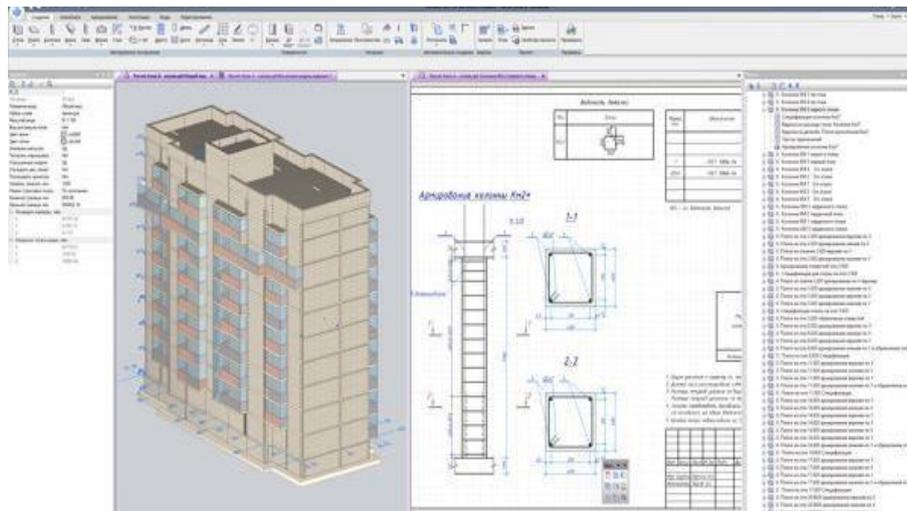


Рис. 1. Зображення моделі для розрахунку на міцність, аналізу будівельних конструкцій та розрахунку на прогресуюче руйнування

Методика створення чисельної моделі в «САПФІР 3Д».

1. Задаються жорсткості матеріалам у вигляді цегли, бетону, металу тощо. Стіни можуть задаватися як у вигляді навантаження так і в якості несучого елемента.

2. Задаються навантаження постійні, тимчасові, вітрові, навантаження від ґрунту, динамічні та ін.

3. Автоматично створюється розрахункове сполучення зусиль.

4. В підсистемі аналітика відбувається коригування вже розрахункової моделі, накладання обмежень (шарніри, жорсткі вставки, відсутність спирання тощо)

5. В підсистемі розрахункова модель відбувається створення ідеалізованої моделі за рахунок дотягування елементів до серединних ліній, пересікання елементів (колона представлена в розрахунковій моделі вже як стержень, а стіна чи плита як оболонка), також тут відбувається налаштування сітки для розбивки скінченних елементів.

На рисунку 2 зображено приклад плану підвального поверху в ПК «САПФІР 3Д». Стіни виконані у вигляді несучого елемента (оболонка), колони у вигляді стержня, які спираються на куцшовий пальовий фундамент, стіни спираються на ростверк пальового фундаменту).

На рисунку 3. наведено приклад плану типового поверху, який виконаний в ПК «САПФІР 3Д».

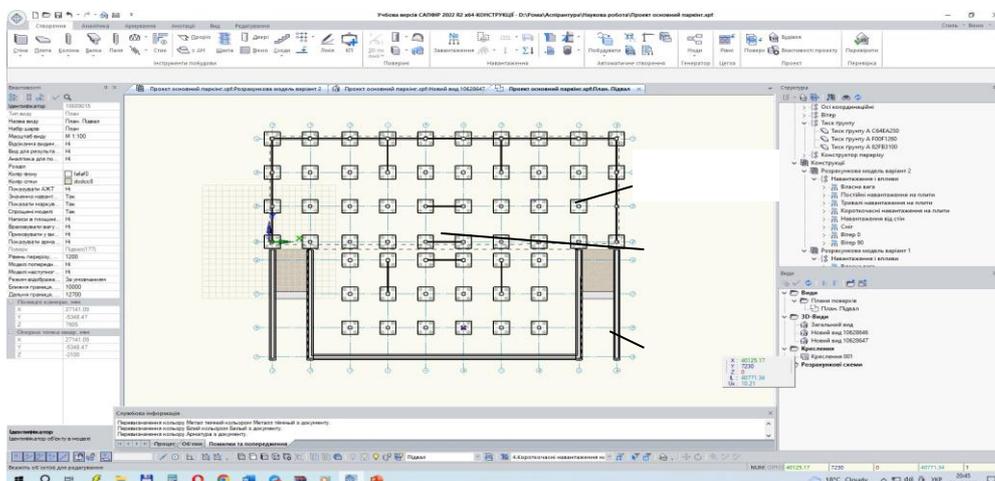


Рис. 2. Загальний вигляд підвального поверху в «САПФІР 3Д»

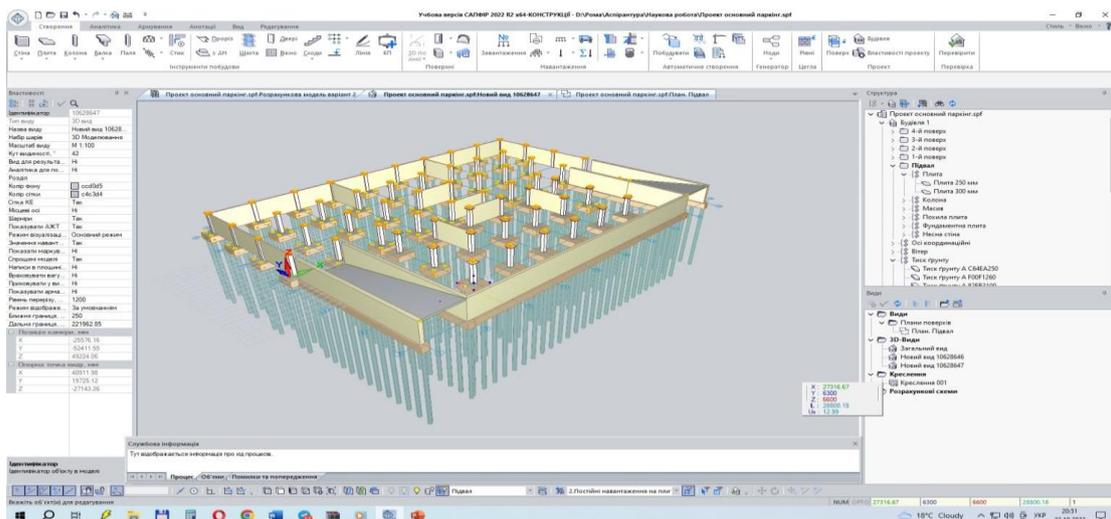


Рис. 3. План типового поверху виконаний в «САПФІР 3Д»

На рисунку 4 наведений загальний вигляд моделі чотирьох поверхової стоянки для автомобілів (паркінг), на рисунку 5 – в підсистемі аналітика, на рисунку 6 – в підсистемі розрахункова модель.

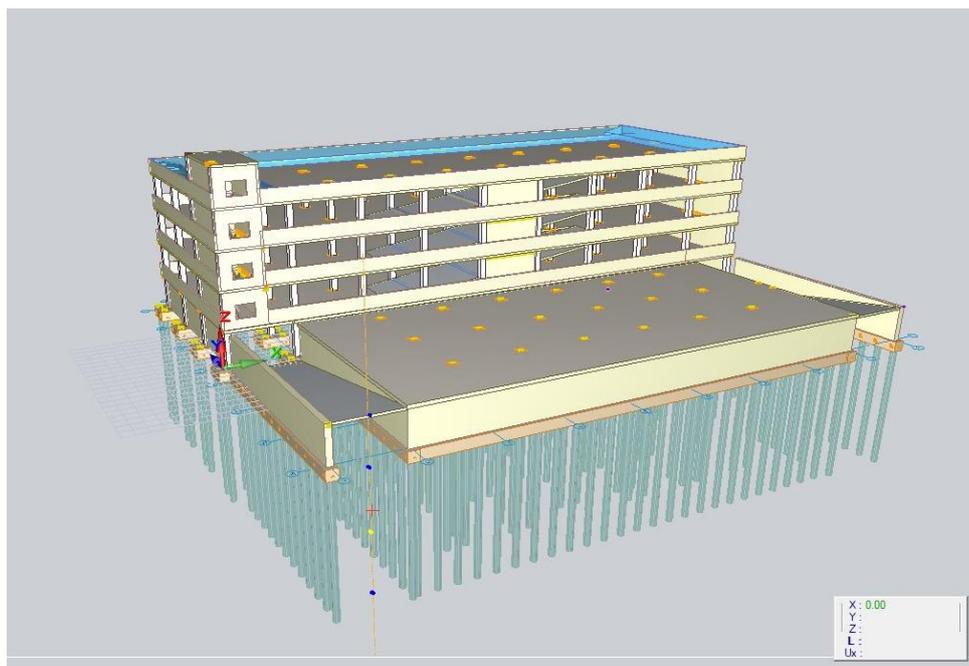


Рис. 4. Загальний вигляд моделі чотирьох поверхової стоянки для автомобілів (паркінг)

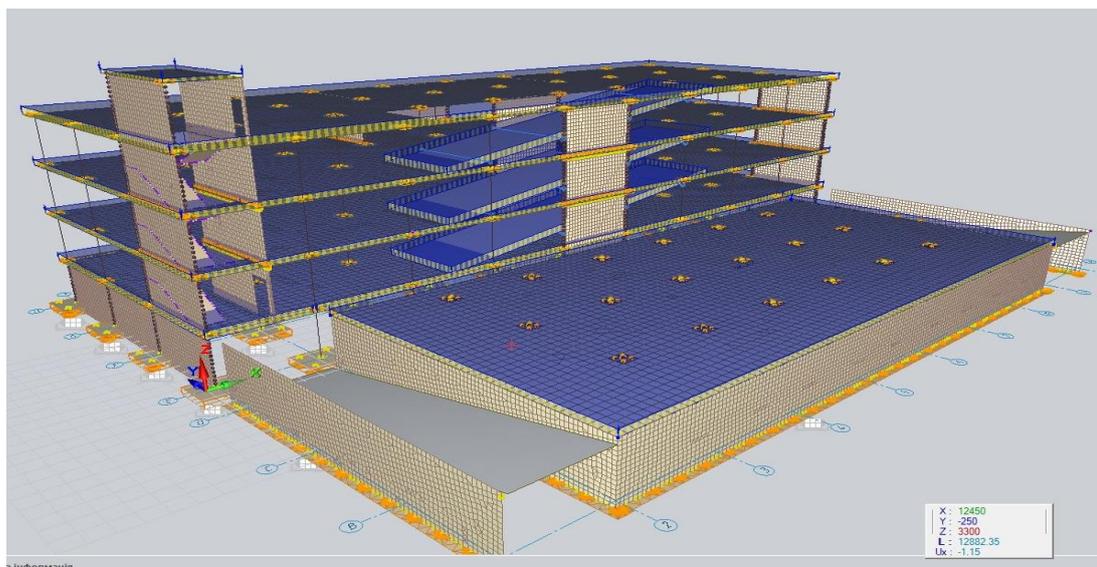


Рис. 5. Загальний вигляд моделі чотирьох поверхової стоянки для автомобілів (паркінг) в підсистемі аналітика.

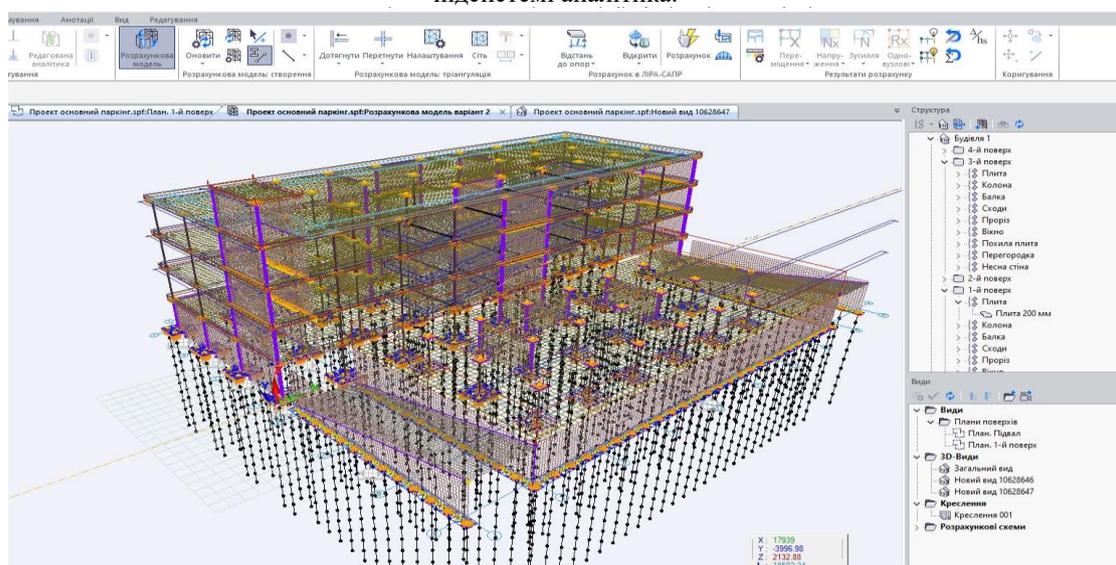


Рис. 6. Загальний вигляд моделі чотирьох поверхової стоянки для автомобілів (паркінг) в підсистемі розрахункова модель

Після перевірки всіх даних, автоматично відбувається передача моделі в ПК ЛІРА «САПР» (рис. 7).



Рис. 7. Загальний вигляд після експорту з ПК «САПФІР 3Д» моделі чотирьох поверхової стоянки для автомобілів (паркінг)

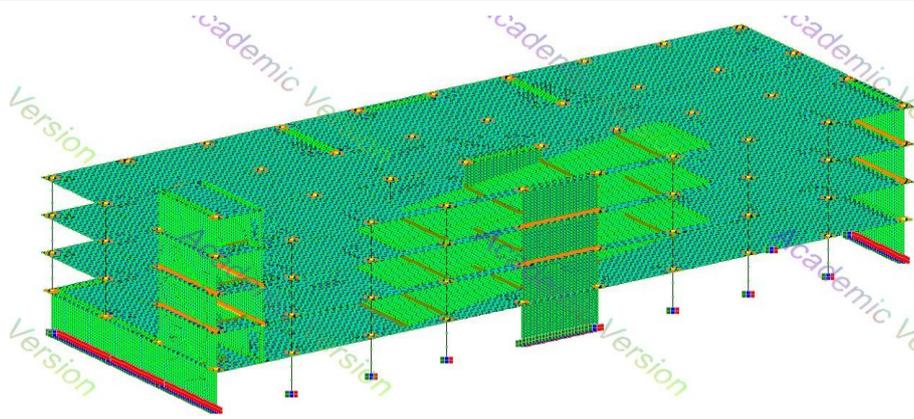


Рис. 9. Схема спрощена модель чотирьох поверхової стоянки для автомобілів (паркінг)

5 ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз наукових праць щодо забезпеченні стійкості та надійності будівлі в системі ґрунт-фундамент-будівля. З огляду на великий потенціал використання підземного простору під забудову постає питання забезпечення стійкості та надійності системи ґрунт-фундамент-будівля для вчасного виявлення ознак руйнувань, осідань ґрунтів або втоми матеріалу конструкцій. Виконаний аналіз літературних джерел та поставлені завдання досліджень. Актуальною науково-технічною задачею є розробка чисельної моделі та методики комплексного розрахунку лавиноподібного обвалу будівель та споруд при пожежі та вибухах з врахуванням особливостей роботи ґрунтів та їх властивостей.

Встановлено, що різноманітність ґрунтових умов та особливостей будівель вимагає індивідуального підходу до розробки моделі. Саме підбір параметрів моделі, які відповідають конкретним умовам, в модулі САПФІР 3Д є важливим етапом у забезпеченні адекватності результатів та розробки ефективних заходів безпеки системи ґрунт-фундамент-будівля при дії силових та високотемпературних впливів.

2. У ході досліджень за допомогою програмного забезпечення «ЛІРА-САПР» розроблена чисельна модель та проведено чисельне моделювання чотирьох поверхової стоянки для автомобілів (паркінг) з врахуванням особливостей роботи ґрунтів та їх властивостей, яка в подальшому буде використана для моделювання лавиноподібного обвалу при пожежі (вибуху).

Для цього першим етапом були проведені роботи з побудови моделі чотирьох поверхової стоянки для автомобілів (паркінг): створення початкового проекту (визначення розмірів та характеристик будівлі, вибір потрібних параметрів для моделювання – висота, ширина, довжина, розташування входів та виходів, розміщення автомобілів); створення 3D моделі в програмі САПФІР 3Д (використання інструментів для побудови будівлі: стіни, стеля, підлоги, сходи, ліфти тощо, додавання елементів паркінгу); встановлення параметрів моделі (вказання матеріалів для будівельних елементів, встановлення параметрів для обчислення навантажень); аналіз моделі та вирішення проблем (перевірка моделі на наявність помилок, корекція параметрів для досягнення оптимальних результатів); виконання обчислень та аналіз результатів; оформлення звіту та висновків.

Другим етапом проведена перевірка моделі в ПК «ЛІРА-САПР», побудований ґрунтовий масив в модулі ґрунт. Роботи включають в себе: імпорт моделі у «ЛІРА-САПР»; аналіз моделі на відповідність (перевірка геометрії та розмірів будівлі у ЛІРА-САПР, перевірка наявності необхідних елементів конструкції та їх параметрів); створення ґрунтового масиву (запуск модуля ґрунт у складі ЛІРА-САПР, вибір параметрів для побудови ґрунтового масиву – тип ґрунту, глибина, параметри

навантаження тощо); побудова ґрунтового масиву (використання інструментів модуля ґрунт для побудови масиву ґрунту під будівлею, вказання параметрів глибини, рівнів, властивостей ґрунтів тощо); аналіз впливу ґрунтового масиву на конструкцію (проведення розрахунків для визначення впливу ґрунтового тиску на конструкцію будівлі, аналіз результатів інженерно-геологічних характеристик ґрунтового масиву на необхідність корекції конструкції будівлі); корекція моделі та повторний аналіз (внесення змін у модель будівлі або параметри ґрунтового масиву, повторний аналіз впливу ґрунтового масиву на конструкцію для визначення відповідних змін та корекцій).

6 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Автори статті «**Моделювання стійкості та надійності системи ґрунт-фундамент-будівля при дії силових та високотемпературних впливів**» не мають відповідних фінансових чи нефінансових інтересів, які слід розкривати.

Література

1. Рашкевич Н.В. Аналіз сучасного стану попередження надзвичайних ситуацій на територіях України, які зазнали ракетно-артилерійських уражень. Комунальне господарство міст, 2023. Том 4, випуск 178. С. 232–251. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-232-251>.
2. Poulos, H.G. (2016). Tall building foundations: design methods and applications. *Innovative Infrastructure Solutions*, 1. 1–51.
3. Van Nguyen, Q., Fatahi, B., & Hokmabadi, A. S. (2016). The effects of foundation size on the seismic performance of buildings considering the soil-foundation-structure interaction. *Structural Engineering and Mechanics*
4. Кундрат, Т. М., Літницький, С. І., Пугачов, Є. В., & Зданевич, В. А. (2022). Structural model of determining of laying foundation depth. *Сучасні проблеми моделювання*, (23). 115–121.
5. Rasouli, H., Takhtfirouzeh, H., Taghavi Ghalesari, A., & Hemati, R. (2017). Bearing capacity improvement of shallow foundations using cement-stabilized sand. *Key engineering materials*, 723. 795–800.
6. Shirazi, M.G., Rashid, A.S.B.A., Nazir, R.B., Rashid, A.H.B.A., Moayedi, H., Horpibulsuk, S., & Samingthong, W. (2020). Sustainable soil bearing capacity improvement using natural limited life geotextile reinforcement—A review. *Minerals*, 10(5). 479
7. Adajar, M. A., Gudes, M., & Tan, L. (2019). The use of woven geotextile for settlement reduction of spread footing on granular soil. *GEOMATE Journal*, 16(58). 211–217.
8. Razuvaev, D.A., Chakhlov, M.G., Soloviova, V.Y., & Karpachevsky, G.V. (2022). Injection compositions for creating impervious screen for roadbed foundation. *Transportation Research Procedia*, 61. 621–626.
9. François, S., Schevenels, M., Thyssen, B., Borgions, J., & Degrande, G. (2012). Design and efficiency of a composite vibration isolating screen in soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 39. 113–127.
10. Bouassida, M., Fattah, M.Y., & Mezni, N. (2022). Bearing capacity of foundation on soil reinforced by deep mixing columns. *Geomechanics and Geoengineering*, 17(1). 309–320.
11. Bonić, Z., Ćurčić, G. T., Trivunić, M., Davidović, N., & Vatin, N. (2015). Some methods of protection of concrete and reinforcement of reinforced-concrete foundations exposed to environmental impacts. *Procedia Engineering*, 117. 419–430.

12. Stepanova, I.V., Abu-Khasan, M., & Soloviova, V.Y. (2015). Innovative Structural-Heat-Insulating Concrete for Insulation and Stability Rise of Frozen Foundation Soils. Scientific Publication, (6/6). 387
13. Harte, M., Basu, B., Nielsen, S. (2012). Dynamic analysis of wind turbines including soil-structure interaction. *Eng Struct*, 45. 509–18.
14. Grange, S., Botrugno, L., Kotronis, P., Tamagnini, C. (2011). The effects of Soil–Structure Interaction on a reinforced concrete viaduct. *Earthq Eng Struct Dyn*, 40(1). 93–105.
15. Salciarini, D., Tamagnini, C. (2009). A hypoplastic macroelement model for shallow foundations under monotonic and cyclic loads. *Acta Geotechnica*, 4(3). 163–76.
16. Jeremic, B., Jie, G., Preisig, M., Tafazzoli, N. (2009). Time domain simulation of soil–foundation–structure interaction in non-uniform soils. *Earthq Eng Struct Dyn*, 38(5). 699–718.
17. Отрош Ю.А., Ковальов А.І., Пурденко Р.Р., Рашкевич Н.В., Майборода Р.І. Дослідження вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій для підвищення рівня пожежної безпеки // Проблеми надзвичайних ситуацій. Х.: НУЦЗУ. 2022. № 36. С.102-122.
18. Ковальов А.І., Отрош Ю.А., Томенко В.І., Качкар Є.В., Майборода Р.І. Оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій // Вісті Донецького гірничого інституту. Донецьк: ДВНЗ «ДНТУ». 2022. № 2. С.43-53.

References

1. Rashkevych, N.V. (2023). Analiz suchasnoho stanu poperedzhennya nadzvychaynykh sytuatsiy na terytoriyakh Ukrainy, yaki zaznaly raketno-artyleriys'kykh urazhen'. *Komunal'ne gospodarstvo mist*. 4 (178). 232–251. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-232-251>
2. Poulos, H.G. (2016). Tall building foundations: design methods and applications. *Innovative Infrastructure Solutions*, 1. 1–51.
3. Van Nguyen, Q., Fatahi, B., & Hokmabadi, A.S. (2016). The effects of foundation size on the seismic performance of buildings considering the soil-foundation-structure interaction. *Structural Engineering and Mechanics*
4. Kundrat, T.M., Litnitsky, S.I., Pugachev, E.V., & Zdanevich, V.A. (2022). Structural model of determining of laying foundation depth. *Suchasni problemy modelyuvannya*, (23). 115–121.
5. Rasouli, H., Takhtfirouzeh, H., Taghavi Ghalesari, A., & Hemati, R. (2017). Bearing capacity improvement of shallow foundations using cement-stabilized sand. *Key engineering materials*, 723. 795–800.
6. Shirazi, M.G., Rashid, A.S.B.A., Nazir, R.B., Rashid, A.H.B.A., Moayedi, H., Horpibulsuk, S., & Samingthong, W. (2020). Sustainable soil bearing capacity improvement using natural limited life geotextile reinforcement—A review. *Minerals*, 10(5). 479.
7. Adajar, M. A., Gudes, M., & Tan, L. (2019). The use of woven geotextile for settlement reduction of spread footing on granular soil. *GEOMATE Journal*, 16(58). 211–217.
8. Razuvaev, D.A., Chakhlov, M.G., Soloviova, V.Y., & Karpachevsky, G.V. (2022). Injection compositions for creating impervious screen for roadbed foundation. *Transportation Research Procedia*, 61. 621–626.
9. François, S., Schevenels, M., Thyssen, B., Borgions, J., & Degrande, G. (2012). Design and efficiency of a composite vibration isolating screen in soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 39. 113–127.
10. Bouassida, M., Fattah, M.Y., & Mezni, N. (2022). Bearing capacity of foundation on soil reinforced by deep mixing columns. *Geomechanics and Geoengineering*, 17(1). 309–320.

11. Bonić, Z., Ćurčić, G. T., Trivunić, M., Davidović, N., & Vatin, N. (2015). Some methods of protection of concrete and reinforcement of reinforced-concrete foundations exposed to environmental impacts. *Procedia Engineering*, 117. 419–430.
12. Stepanova, I.V., Abu-Khasan, M., & Soloviova, V.Y. (2015). Innovative Structural-Heat-Insulating Concrete for Insulation and Stability Rise of Frozen Foundation Soils. *Scientific Publication*, (6/6). 387.
13. Harte, M., Basu, B., Nielsen, S. (2012). Dynamic analysis of wind turbines including soil-structure interaction. *Eng Struct*, 45. 509–18.
14. Grange, S., Botrugno, L., Kotronis, P., Tamagnini, C. (2011). The effects of Soil–Structure Interaction on a reinforced concrete viaduct. *Earthq Eng Struct Dyn*, 40(1). 93–105.
15. Salciarini, D., Tamagnini, C. (2009). A hypoplastic macroelement model for shallow foundations under monotonic and cyclic loads. *Acta Geotechnica*, 4(3). 163–76.
16. Jeremic, B., Jie, G., Preisig, M., Tafazzoli, N. (2009). Time domain simulation of soil–foundation–structure interaction in non-uniform soils. *Earthq Eng Struct Dyn*, 38(5). 699–718.
17. Otrosh Yu.A., Kovalov A.I., Purdenko R.R., Rashkevych N.V., Maiboroda R.I. *Doslidzhennia vohnestiikosti vohnezakhyshchenykh zalizobetonnykh konstruktsii dlia pidvyshchennia rivnia pozhezhnoi bezpeky // Problemy nadzvychainykh sytuatsii. Kh.: NUTsZU. 2022. № 36. S.102-122.*
18. Kovalov A.I., Otrosh Yu.A., Tomenko V.I., Kachkar Ye.V., Maiboroda R.I. *Otsiniuvannia vohnestiikosti vohnezakhyshchenykh stalevykh konstruktsii // Visti Donetskoho hirnychoho instytutu. Donetsk: DVNZ «DNTU». 2022. № 2. S.43-53.*

Пурденко Роман Русланович

Національний університет цивільного захисту України,
аспірант

вул. Чернишевська, 94, Харків, Україна, 61023

ORCID: 0000-0001-6467-4133

Отрош Юрій Анатолійович

Національний університет цивільного захисту України,
д.т.н., професор

вул. Чернишевська, 94, Харків, Україна, 61023

yuriiyotrosh@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0698-2888

Рашкевич Ніна Владиславівна

Національний університет цивільного захисту України,
доктор філософії, старший викладач

вул. Чернишевська, 94, Харків, Україна, 61023

nine291085@gmail.com

ORCID: 0000-0001-5124-6068

Суриянінов В'ячеслав Миколайович

Одеська державна академія будівництва та архітектури,
асистент

вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029

citykboss@odaba.edu.ua

ORCID: 0009 0006 9620 4287

Для посилань:

Пурденко Р. Р., Отрош Ю. А., Рашкевич Н. В., Суриянінов В. М. Моделювання стійкості та надійності системи ґрунт-фундамент-будівля при дії силових та високотемпературних впливів. *Механіка та математичні методи*, 2024. Т. VI. № 1. С. 36–48.

For references:

R. Purdenko, Yu. Otrosh, N. Rashkevich, S. Suryaninov (2024). Simulation of stability and reliability of the soil-foundation-building system under force and high-temperature influences. *Mechanics and Mathematical Methods*. V(2). 36–48.

УДК 624.154.3

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ВПЛИВІВ НА БУДІВЕЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ

Фомін В. М.¹, Фоміна І. П.¹

¹Одеська державна академія будівництва та архітектури

Анотація. Вирішення проблеми математичного моделювання динамічних впливів на будівельні конструкції розглянута у загальному вигляді та у зв'язку із важливими науковими та практичними завданнями. Багато років частіше з'являється інформація про катастрофічні руйнування будівель і споруд, які є наслідком не тільки помилок, що виникли в процесі будівництва об'єктів, але і через динамічні впливи, що виникли в процесі їх експлуатації. Кожна будівля і споруда є складною технічною системою із наперед заданими технічними параметрами, які повинні контролюватися в процесі виготовлення конструкцій, будівельно-монтажних робіт, при прийманні і в ході експлуатації.

Експлуатація будівель і споруд постійно пов'язується з використанням будівельної техніки, обладнанням та устаткуванням, які призводять до динамічних впливів на будівельні конструкції. Особливо це впливає на експлуатування в складних інженерно-геологічних умовах будівель та споруд, які зазнали попередніх деформацій від нерівномірних осідань ґрунтової основи.

Значною частиною динамічних впливів є землетруси. За допомогою сейсмометричної апаратури вимірюють швидкість та період коливань ґрунту біля фундаменту будівлі і порівнюють їх з допустимою швидкістю коливань ґрунту для будівлі. Фактична сейсмічна стійкість споруд, що підлягають збереженню, визначається співвідношенням періодів коливань ґрунту та споруди.

Для структурної динаміки використовуються різні методи, такі як модальний аналіз, аналіз спектру відгуку, часовий аналіз та аналіз методом кінцевих елементів. Ці методи містять математичне моделювання, чисельне моделювання та обчислювальні методи для прогнозування поведінки та реакції конструкції в умовах динамічного навантаження.

Знаючи власні частоти та форми коливань, можна оцінити динамічну реакцію конструкції на прикладені навантаження. Це включає визначення переміщень, прискорень і внутрішніх сил в різних місцях конструкції. Аналіз реагування допомагає оцінити характеристики конструкції, визначити критичні області та переконатися, що проект відповідає бажаним критеріям [1].

Ключові слова: динамічна модель, будівельна конструкція, корозія, землетрус, теорія коливань.

MATHEMATICAL MODELING OF DYNAMIC IMPACTS ON BUILDING STRUCTURES

V. Fomin¹, I. Fomina¹

¹Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. The solution of the problem of mathematical modeling of dynamic influences on building structures is considered in general and in connection with important scientific and practical tasks. In modern conditions, special attention should be paid to the problems of taking into account dynamic influences, parameters of load-bearing structures of buildings that affect their structural reliability and safety. For many years, information about catastrophic destruction of buildings and structures has been appearing more often, which are the result not only of errors that arose during the construction of facilities, but also due to dynamic influences that arose during their operation.



A buildable technical system will be used in advance with the technical parameters set, which is responsible for the control of the process of the preparation of structures, the installation of the equipment, during the operation and operation. The development will be carried out and the sporud will be constantly used to promote the development of future technologies, the development and the establishment of the future, as well as the development of dynamic developments in the future. In particular, it is important to understand the development of the engineering and geological minds of the spores, as they have known the front deformation of the non-essential axis of the runt foundations.

Various methods are used for structural dynamics, such as modal analysis, response spectrum analysis, time analysis, and finite element analysis. These methods include mathematical modeling, numerical simulation, and computational methods to predict the behavior and response of a structure under dynamic load conditions.

Knowing the frequency and form of the structure, it is possible to estimate the dynamic reaction of the design to the application. For the purpose of including the transfer of the world, the destruction of internal forces in the real parts of the construction. Analyses of the response to the additional assessment of the characteristics of the construction, the identification of critical areas and the re-conversion, which the project is able to meet the criteria.

Keywords: dynamic model, building structure, corrosion, earthquake, oscillation theory.

1 ВСТУП

У сучасних умовах особливої уваги потребують проблеми врахування динамічних впливів, параметри несучих конструкцій будівель, що впливають на їх конструктивну надійність і безпеку.

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Україна — на війні. Зазнають атак ворога населені пункти, житло, промислові об'єкти, угіддя, зелені зони. Багато мирних міст перетворилися на поля битв і руйнуються під час боїв, значні території забруднені боєприпасами. Це травматичний досвід для кожного, бо нам хочеться вважати свій світ — місто, рідну вулицю, домівку — міцним місцем, яке не може бути ушкодженим.

Проте є інші, не менш, а можливо, і більш неблаганні суперники для людського житла. Принаймні їх неможливо перемогти зброєю. Це — сили стихії, прояви змін клімату і час, який робить вірогідність тих чи інших подій практично гарантованою. Кожне місто розташоване на території, яка має свій контекст: особливості, зумовлені геологією та сейсмікою, рельєфом, факторами природного й техногенного походження [2]. У лютому 2023 року сталася низка руйнівних землетрусів на південному сході Туреччини та близькій до кордону частині Сирії. Потужність першого поштовху з епіцентром поблизу Газіантепа склала 7,8 балів за шкалою Ріхтера. Такі процеси мають значний вплив на сучасне будівництво. Для України також характерними є зсуви — на Прикарпатті, Хмельниччині, у східній частині країни. Від них страждають населені пункти поблизу морського узбережжя, наприклад на Одещині і в Криму. Витривалість споруд до можливого впливу стихії набуває нових контекстів під час війни, яка триває зараз. Ми бачимо, як під час обстрілів чи бомбардувань одні будівлі значно руйнуються або «складаються», а інші витримують удари чи пожежі з меншими втратами і можуть бути відновлені. Чи буде сейсмічно стійка будівля більш витривалою до інших впливів, наприклад у разі вибуху?

Традиційні залізобетонні колони продемонстрували погані сейсмічні характеристики, особливо в агресивному середовищі, оскільки за таких умов арматурні стрижні зазнають сильної корозії. Щоб вирішити проблему корозії сталі, останніми роками значну увагу привернули залізобетонні колони зі склопластику (GFRP). Однак сейсмічні характеристики залізобетонної колони із склопластику ще недостатньо вивчені. Однією з основних проблем, пов'язаних з використанням стрижнів зі склопластику, є їхня крихкість. Тому необхідно дослідити механічні властивості та види руйнування залізобетонних конструкцій із склопластику при сейсмічному впливі. У цьому дослідженні сейсмічну поведінку залізобетонних колон зі склопластику та звичайних колон при різних ступенях осьового стиснення аналізується за допомогою малоциклових повторних випробувань на псевдостатичне навантаження. В результаті досліджуються та обговорюються деформація та здатність розсіювати сейсмічну енергію залізобетонних колон зі склопластику. Крім того, вивчається механізм руйнування стрижневої конструкції зі склопластику, щоб забезпечити основу для покращення методу сейсмічного розрахунку залізобетонної конструкції зі склопластику та зміни норм для сейсмічного розрахунку. Крім того, досліджується вплив ступеня осьового стиснення на сейсмічну поведінку колон із цільного склопластику. Результати цього експерименту показують, що зі збільшенням ступеня осьового стиснення гранична несуча здатність залізобетонних колон зі склопластику збільшується, а деформація та сукупна здатність розсіювання енергії зменшуються [3-15].

3 ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Предметом математичного аналізу динамічного впливу є такі динамічні моделі, що відображають різні типи навантажень, а саме коливання від дії різних сил, що надають системі одну чи дві ступені свободи[16].

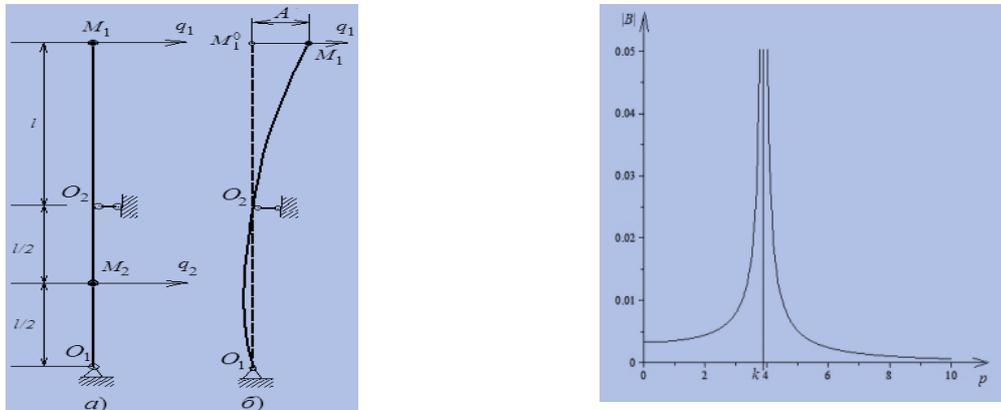


Рис. 1. Схема навантажень та графік частот коливань

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Розглянемо рух пружної механічної системи з однією ступенню свободи при землетрусі.

Опори O_1 і O_2 рухаються із заданим прискоренням

$$a(t) = Ue^{-\epsilon t} \sin pt . \tag{1}$$

Це приводить до появи сили інерції $J = -m_1 a$, яка діє на точку M_1 і приводить у рух механічну систему (рис.1). Рух точки M_1 визначемо за формулою

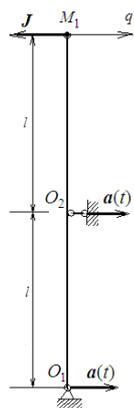


Рис. 2. Динамічна модель

$$q(t) = \frac{U}{k[\epsilon^2 + (p-k)^2][\epsilon^2 + (p+k)^2]} \{2\epsilon k p \cos kt - p(\epsilon^2 + p^2 - k^2) \sin kt - e^{-\epsilon t} [2\epsilon k p \cos pt + k(\epsilon^2 - p^2 + k^2) \sin pt]\} . \tag{2}$$

Після підстановки значень U , p , k і ϵ одержуємо закон руху точки M_1

$$q(t) = 0.0006015 \cos kt + 0.017 \sin kt - e^{-\xi t} (0.0006015 \cos pt + 0.021 \sin pt). \quad (3)$$

Для пружної механічної системи також можливо скласти рівняння вільного руху при наступних значеннях початкових переміщень і швидкостей:

початкові переміщення точок M_1 і M_2 :

$$q_{1,0} = 0,1 \text{ м}, q_{2,0} = 0,01 \text{ м},$$

початкові швидкості точок:

$$V_{1,0} = 0,1 \text{ м/с}, V_{2,0} = 0.$$

Знайдемо значення головних координат і їхніх похідних при $t = 0$:

$$\begin{aligned} \eta_{1,0} &= m_1 q_{1,0} A_1^{(1)} + m_2 q_{2,0} A_2^{(1)} = 0,1088, \\ \eta_{2,0} &= m_1 q_{1,0} A_1^{(2)} + m_2 q_{2,0} A_2^{(2)} = -0,0257, \\ \zeta_{1,0} &= m_1 V_{1,0} A_1^{(1)} + m_2 V_{2,0} A_2^{(1)} = 0,0973, \\ \zeta_{2,0} &= m_1 V_{1,0} A_1^{(2)} + m_2 V_{2,0} A_2^{(2)} = 0,0230. \end{aligned} \quad (4)$$

Розв'язок системи диференціальних рівнянь вільного руху системи представимо в наступному виді:

$$\begin{aligned} \eta_1(t) &= \Psi_1 \sin(k_1 t + \gamma_1), \\ \eta_2(t) &= \Psi_2 \sin(k_2 t + \gamma_2). \end{aligned} \quad (5)$$

Значення Ψ_1 , Ψ_2 , γ_1 і γ_2 визначимо з формул

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= \sqrt{\eta_{1,0}^2 + \frac{\zeta_{1,0}^2}{k_1^2}} = 0,1092, \quad \Psi_2 = \sqrt{\eta_{2,0}^2 + \frac{\zeta_{2,0}^2}{k_2^2}} = 0,0257, \\ \gamma_1 &= \arctg \frac{k_1 \eta_{1,0}}{\zeta_{1,0}} = 1,487, \quad \gamma_2 = \arctg \frac{k_2 \eta_{2,0}}{\zeta_{2,0}} = -1,514. \end{aligned} \quad (6)$$

5 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Якщо зневажити дуже малими (у порівнянні з іншими) доданками, то рівняння руху спрощується:

$$q(t) = 0.017 \sin kt - 0.021 e^{-\xi t} \sin pt. \quad (7)$$

і графік його може бути легко побудований (рис.4).

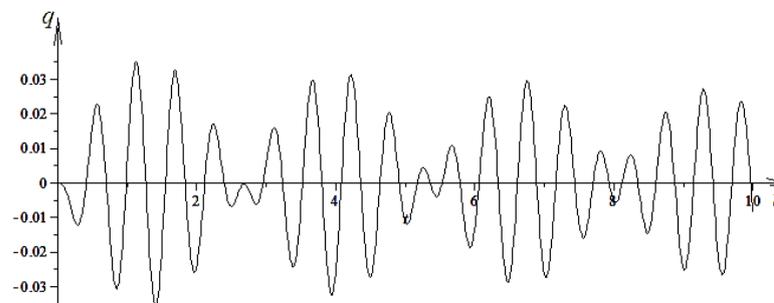


Рис. 4. Графік вільного руху

6 ВИСНОВКИ

При створенні динамічної моделі та з урахуванням динамічного впливу можливо створити математичний опис динамічного навантаження та врахувати це для запобігання порушення експлуатаційних вимог чи руйнування будівельних конструкцій та споруд.

7 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Автори не мають відповідних фінансових чи нефінансових інтересів, які слід розкривати.

Література

1. Діагностика стійкості промисловості будівельних матеріалів в сучасних умовах / О.В. Хахльов // *Культура народів Причорномор'я*. — 2006. — № 83. — С. 23-26.
2. *Український журнал будівництва та архітектури*, № 1(001), 2021, ISSN 2710-0367 (print), ISSN 2710-0375 (online) *Український журнал будівництва та архітектури*
3. Nabid N., Hajirasouliha I., Petkovski M. Adaptive low computational cost optimisation method for performance-based seismic design of friction dampers. *Engineering Structures*. 2019. Vol. 198. Pp. 109549-1–109549
4. Ontiveros-Pérez S. P., Miguel L.F.F., Riera J.D. Reliability-based optimum design of passive friction dampers in buildings in seismic regions. *Engineering Structures*. 2019. Vol. 190. Pp. 276–284.
5. Ontiveros-Pérez S. P., Miguel Letícia F.F., Miguel Leandro F.F. A new assessment in the simultaneous optimization of friction dampers in plane and spatial civil structures. *Mathematical Problems in Engineering*. 2017. Article ID 6040986. 18 p.
6. ДБН В.1.1-12-2014. Будівництво у сейсмічних районах України. [Чинний від 16.05.2014]. Київ :Мінрегіон України, 2014. 110 с.
7. Данішевський В. В., Гайдар А. М. Метод рою частинок для розв'язання задач нелінійної оптимізації. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. № 6. С. 18–25.
8. Данішевський В. В., Гайдар А. М. Оптимізація розташування демпферів сухого тертя для сейсмічного захисту каркасних будівель за допомогою методу рою частинок. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2020. Т. 80. С. 34–42.
9. Xu S., Rahmat-Samii Y. Boundary conditions in particle swarm optimization revisited. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2007. Vol. 55. Pp. 760–765.
10. Christoph Adam, University of Innsbruck Assessment of the dynamic stability of tall buildings subjected to severe earthquake excitation <https://www.researchgate.net/publication/315892521>
11. Лук'янченко О. О., Ворона Ю. В., Костіна О.В., Геращенко О.В. Застосування вейвлет-аналізу до моделювання стохастичної поведінки пружних систем при сейсмічному впливі // *Опір матеріалів і теорія споруд*. – К: КНУБА, 2017. – Вип. 99. – С. 160–180.
12. Лук'янченко О.О., Костіна О. В., Геращенко О.В. Дослідження сейсмічної хвильової реакції просторової конструкції // *Опір матеріалів і теорія споруд*. – К: КНУБА, 2018. – Вип. 101. – С. 83–102.
13. Лук'янченко О. О., Ворона Ю. В., Костіна О. В. Вейвлет-аналіз сейсмічної хвильової реакції каркасної будівлі // *Опір матеріалів і теорія споруд*. – К: КНУБА, 2019. – Вип. 103. – С. 131–134.
14. Lizunov P. P., Nedin V. O. The gyroscopic forces influence on the oscillations of the rotating shafts, *Strength of Materials of Structures*.– K.: KNUCA, 2020. – V. 105. – С. 199–207.
15. Tian, L.; Zhu, Z.; Bai, C.; Shen, C. Nonlinear Dynamic Stability of Cylindrical Reticulated Shells with Initial Damage. *Buildings* 2023, 13, 2852. <https://doi.org/10.3390/buildings13112852> Academic
16. V. M. Fomin, I. P. Fomina. Dynamic models for engineering problems, OSACEA, Odessa, 2021

References

1. Diagnostyka stiykosti promislovosti budivelnih materialiv v sychasnih umovah / O. V. Halov // Kultura narodiv Prichernomoria. — 2006. — № 83. — P. 23-26.
2. Ukrainskiy zurnal ,budivnitsva ta arhitekturi, № 1(001), 2021, ISSN 2710-0367 (print), ISSN 2710-0375 (online)
3. Nabid N., Hajirasouliha I., Petkovski M. Adaptive low computational cost optimisation method for performance-based seismic design of friction dampers. *Engineering Structures*. 2019. Vol. 198. Pp. 109549-1–109549
4. Ontiveros-Pérez S.P., Miguel L. F. F. and Riera J. D. Reliability-based optimum design of passive friction dampers in buildings in seismic regions. *Engineering Structures*. 2019, vol. 190, pp. 276–284.
5. Ontiveros-Pérez S. P., Miguel Letícia F. F. and Miguel Leandro F. F. A new assessment in the simultaneous optimization of friction dampers in plane and spatial civil structures. *Mathematical Problems in Engineering*. 2017. Article ID 6040986. 18 p.
6. DBN V.1.1-12-2014. *Budivnitsvo u seysmichnih rayonah UkraYini* [Construction in seismic regions of Ukraine]. Ranked from 16.05.2014. Kyiv : Minrehion Ukrainy Publ., 2014, 110 p. (in Ukrainian)
7. Danishevskyy V. V. and Gaidar A. M. *Metod royu chastinok dlya rozv'yazannya zadach nelsiniynoyi optimizatsiyi* [Method of rotation of particles to solve the problems of nonlinear optimization]. *Visnik Pridniprovskoy i derzhavnoy i akademiyi budivnitsva ta arhitekturi* [Bulletin of Prydniprovaska State Academy of Civil Engineering and Construction]. 2019, no. 6, pp. 18–25. (in Ukrainian)
8. Danishevskyy V. V. and Gaidar A. M. *Optimizatsiya roztašuvannya dempferiv suhogo tertya dlya seysmichnogo zahistu karkasnih budivel za dopomogoyu metodu royu chastinok* [Optimization of the location of dry friction dampers for seismic protection of frame buildings using the particles method]. *Visnik Odeskoyi derzhavnoy akademiyi budivnitsva ta arhitekturi* [Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Construction]. 2020, vol. 80, pp. 34–42. (in Ukrainian).
9. Xu S., Rahmat-Samii Y. Boundary conditions in particle swarm optimization revisited. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2007. Vol. 55. Pp. 760–765.
10. Christoph Adam, University of Innsbruck Assessment of the dynamic stability of tall buildings subjected to severe earthquake excitation <https://www.researchgate.net/publication/315892521>.
11. Lukianchnko O. O., Vorona U. V., Kostina O. V., Geraschenko O. V. Zastosuvannya veivlet-analizu do modeluvannya stohastichnoi povedinki pruznih sistem pri ceismichnomu hvivi // *Opir materialiv i rteoriya sporud*. – K: KNUBA, 2017. – Vip. 99. – P. 160 –180.
12. Lukianchnko O.O., Kostina O.V., Geraschenko O.V. Doslidzennya ceismichnomu hvivovoi reakcii prostorovoi konstruksii // *Opir materialiv i rteoriya sporud*. – K: KNUBA, 2018. – Vip. 101. – P. 83 –102.
13. Lukianchnko O. O., Vorona U. V., Kostina O. V., Veivlet- analiz ceismichnomu hvivovoi reakcii karkasnoi budivli // *Opir materialiv i rteoriya sporud*. – K: KNUBA, 2019. – Vip. 103. – P. 131 – 134.
14. Lizunov P. P., Nedin V. O. The gyroscopic forces influence on the oscillations of the rotating shafts, *Strength of Materials of Structures*.– K.: KNUCA, 2020. – V. 105. – C. 199 –207.
15. Tian, L.; Zhu, Z.; Bai, C.; Shen, C. Nonlinear Dynamic Stability of Cylindrical Reticulated Shells with Initial Damage. *Buildings* 2023, 13, 2852. <https://doi.org/10.3390/buildings13112852> Academic
16. V. M. Fomin, I. P. Fomina. *Dynamic models for engineering problems*, OSACEA, Odessa, 2021

Фомін Володимир Михайлович

Одеська державна академія будівництва та архітектури,
д.т.н., професор
вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029
Fomin@ogasa.org.ua
ORCID: 0000-0003-4814-6415



Фоміна Інна Петрівна

Одеська державна академія будівництва та архітектури
старший викладач
вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029
Fomina@ogasa.org.ua
ORCID: 0000-0001-7366-1537

Для посилань:

Фомін В. М., Фоміна І. П. Математичне моделювання динамічних впливів на будівельні конструкції. Механіка та математичні методи, 2024. Т. VI. № 1. С. 49–56.

For references:

V. Fomin, I. Fomina. (2024). Mathematical modeling of dynamic impacts on building structures. Mechanics and Mathematical Methods. VI (1). 49–56.

УДК 519.2

МЕТОД УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОТОЧНИХ ЧАСТИН ЕЛЕМЕНТІВ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ЖИТЛОВИХ КОМПЛЕКСІВ

Арсирій В. А.¹, Крошка О. В.¹

¹Одеська державна академія будівництва та архітектури

Анотація. Показано, що показників бажаної ефективності на енергетичних об'єктах на можливо досягти за рахунок зниження опорів в елементах гідро аеродинамічних систем, які забезпечують процеси підйому, стиснення, розширення і транспортування рідин та газів і тому є основними споживачами електричної енергії на так звані власні потреби. Тому отримав подальший розвиток метод удосконалення проточної частини елементів гідро та аеродинамічних систем, який полягає в отриманні кількісної та якісної оцінок стану газових потоків в цих елементах, що дозволяє синтезувати проточні частини елементів гідро аеродинамічних систем зі зниженим опором. Розроблено загальну схему методу удосконалення проточної частини елементів гідро аеродинамічних систем. Реалізація методу потребує виконання трьох етапів: отримання кількісної оцінки стану газових потоків в проточній частині елемента, який удосконалюється; отримання якісної оцінки стану газових потоків в проточній частині елемента, який удосконалюється та синтез удосконаленої проточної частини елемента гідро та аеродинамічних систем. Показано практичну можливість зниження в 2,6 рази (з 0,040 до 0,015) значенням гідро аеродинамічного опору за рахунок самоорганізації структури потоків рідини або газів у проточній частині елемента ГАС «повороті потоку на 180°».

Ключові слова: житлові комплекси, аеро та гідро системи, опір, фізичне моделювання, візуалізація, структура потоків, самоорганізація.

IMPROVEMENT METHOD OF FLOW PARTS OF ENERGY SYSTEM ELEMENTS OF RESIDENTIAL COMPLEXES

V. Arsirii¹, O. Kroshka¹

¹Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract: It is shown that the desired efficiency indicators at energy facilities can be achieved by reducing the resistance in the elements of hydro-aerodynamic systems, which provide the processes of lifting, compression, expansion and transportation of liquids and gases and are therefore the main consumers of electrical energy for the so-called own needs. Therefore, the method of improving the flow part of elements of hydro and aerodynamic systems, which consists in obtaining a quantitative and qualitative assessment of the state of gas flows in these elements, which allows synthesizing the flow parts of elements of hydro aerodynamic systems with reduced resistance, received further development. A general scheme of the method of improving the flow part of elements of hydro-aerodynamic systems has been developed. Implementation of the method requires three stages: obtaining a quantitative assessment of the state of gas flows in the flow part of the element being improved; obtaining a qualitative assessment of the state of gas flows in the flow part of the element that is being improved and the synthesis of the improved flow part of the element of hydro and aerodynamic systems. The practical possibility of a 2.6-fold decrease (from 0.040 to 0.015) in the



value of hydro resistance due to the self-organization of the structure of liquid or gas flows in the flow part of the HAS element turn the flow by 180 is shown.

Keywords: residential complexes, aero and hydro systems, resistance, physical modelling, visualization, flow structure, self-organization.

1 ВСТУП

В період післявоєнного відновлення об'єктів енергетичної інфраструктури України необхідно враховувати сучасні світові тенденції до ефективного споживання енергії у системах теплової та електричної генерації тепло-, газо- і водопостачання, вентиляції, кондиціонування, тощо. Проведений аналіз довів, що показників бажаної енергоефективності можливо досягти за рахунок зниження опорів в елементах гідроаеродинамічних систем (ГАС), які забезпечують процеси підйому, стиснення, розширення і транспортування рідин та газів і тому є основними споживачами електричної енергії на так звані власні потреби [1,2]. Тому удосконалення проточних частин елементів ГАС з метою зниження їх гідроаеродинамічних опорів є актуальною задачею, вирішення якої відповідає сучасній тенденції на енергозбереження.

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Проведені дослідження та результати отримані в попередніх роботах авторів показують, що вирішення задачі зниження опорів в елементах ГАС можливо за допомогою методів наукової візуалізації з використанням засобів фізичного та чисельного моделювання [3]. Моделювання – це дослідження об'єкта шляхом створення його моделі (квазіоб'єкта фізичного або математичного прототипу) і оперування нею з метою отримання корисної інформації про реально функціонуючий об'єкт. Іноді термін «моделювання» використовують у вузькому сенсі стосовно створення моделі, а оперування моделлю називають аналізом або верифікацією [4].

Наукова візуалізація (scientific visualization) – візуальне уявлення про чисельні данні, які є результатами наукових досліджень або прикладних, інженерних і технологічних розрахунків, на сьогоднішній день є найважливішою галуззю знання і технологічного розвитку. Спочатку роль методів і алгоритмів візуального представлення чисельних даних розглядалася в наукових і інженерних дисциплінах як допоміжна. При цьому виділялися дві функції візуалізації:

- забезпечення контролю та об'єктивної трактування чисельних результатів;
- ілюстративна функція.

З плином часу ситуація докорінно змінилася. З ілюстративного і за своїми функціями допоміжного інструменту наукова візуалізація стала повноправним і часто єдиним інструментом, здатним прояснити суть фізичного процесу. Роль наукової візуалізації стала основною [3]. При реалізації основної наукової ролі засобів візуалізації можна виділити фізичний і чисельне моделювання.

Фізичне моделювання (ФМ). При ФМ (експерименті) у багатьох випадках саме оптична картинка є основним первинним результатом досліджень. В області гідроаеродинаміки фотографія картини «невидимих» потоків рідин або газів є основним або єдиним первинним результатом досліджень на деяких експериментальних установках. Отримані за допомогою методів візуалізації зображення часто є єдиним первинним результатом експерименту, а науковий результат отримують шляхом якісної і кількісної обробки фотографії.

Необхідно відзначити, що задовго до появи комп'ютерів і численних експериментів, сама суть отримання результату в фізичному експерименті була заснована на аналізі поля течії, який відображається в дії експериментального приладу. Основні положення, результати та постулати механіки рідини і газу були багато в чому отримані таким експериментальним шляхом.

Фізична візуалізація в експериментах була основним джерелом інформації про явища і процеси до появи математичного моделювання. З появою і розвитком чисельного експерименту, який став більш дешевшим і маневреним інструментом

пізнання фізичної картини світу, фізичний експеримент залишився основним засобом контролю і верифікації численних досліджень [5-7]

При чисельному моделюванні (ЧМ) використовуються аналітичні моделі для розрахунку турбулентних течій. А формування рішень можливо на основі візуалізації процесів переміщення робочого тіла. У підсистему інженерного аналізу CAE входять.

Чисельне моделювання (ЧМ). З появою комп'ютерів виникла можливість проводити обчислювальні експерименти, засновані на чисельному рішенні рівнянь, які використовуються в математичній моделі фізичного явища або процесу, який досліджується. Сучасний етап еволюції обчислювальної механіки рідини і газу забезпечується програмними комплексами обчислювальної гідродинаміки і тепломасообміну, міцності, електродинаміки, такими як CFX, FLUENT, FlowVision, SolidWorks, FOAM, OpenFOAM ін. [8-12] Він характеризується наступними основними факторами, що визначають подальші перспективи розвитку концепцій, методів, алгоритмів і програмних засобів наукової візуалізації:

- інтенсивне зростання обчислювальних потужностей, поява паралельно обчислювальних систем;
- поява принципово нових апаратних засобів, які дозволяють здійснювати тривимірне стерео представлення результатів, побудова апаратно-програмних комплексів віртуальної реальності;
- ускладнення задач обчислювальної механіки рідини і газу.

Слід особливо відзначити, що розвиток програмних засобів візуалізації завжди носило наздоганяючий характер. Візуальне уявлення про чисельні рішення в першу чергу залежало від можливостей обчислювальних ресурсів, і лише в другу - від рівня складності вирішуваних задач математичного моделювання і чисельних методів, що при цьому використовуються.

Таким чином, порівняльний аналіз можливостей ФМ і ЧМ показує, що:

1. ФМ успішно застосовується при проектуванні елементів гідромашин, котлів, реакторів, повітряних і газових трактів та іншого енергетичного обладнання. Однак ФМ притаманні ряд недоліків:

- складність досягнення фізичної подібності між моделлю (фізичним прототипом) і реальним елементом;
- практична неможливість відтворення натурних гідрофізичних умов і просторово-часових масштабів в рамках лабораторного обладнання;
- залежність якості прийнятих рішень від кваліфікації експерта-експериментатора;
- значні витрати ресурсів.

2. ЧМ успішно застосовується завдяки розширенню можливостей комп'ютерних технологій, яке спостерігається в останнє десятиліття в інформаційних технологіях при автоматизації проектування. Однак при їх практичному використанні виникають труднощі:

- так для діагностики складних процесів масопереносу (течії з сильною закруткою, горінням, течії з вільною поверхнею) і при проектування геометрії елемента складної форми тривалість комп'ютерного експерименту збільшується на кілька порядків щодо проектування простих конструкцій;
- оцінити точність отриманого рішення, якщо немає результатів фізичних експериментів (або вони ненадійні) надзвичайно складно;
- потрібно значний досвід експерта для завдання початкових умов ЧМ і вибору множини параметрів для розрахунків.

Тому для подолання недоліків та розширення можливостей ФМ або ЧМ при розробці методу удосконалення проточної частини елементів гідро та аеродинамічних систем (ГАС) пропонується комплексне моделювання, що використовує інструментальні засоби ФМ з можливостями інтелектуального аналізу даних

візуальних даних [13,14]. До методів інтелектуального аналізу даних візуальних даних методи машинного навчання та штучні нейронні мережі, використання яких дозволяє виділити в великих візуальних даних раніше невідомі, нетривіальні, фактично корисні і доступні для інтерпретації знання, необхідні для прийняття рішень зокрема у такій важливій сфері людської діяльності як енергозбереження [15].

3 ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даного дослідження є подальший розвиток методу удосконалення проточної частини елементів гідро та аеродинамічних систем (ГАС), який полягає в отриманні кількісної та якісної оцінок стану газових потоків (ГП) в цих елементах, що дозволяє синтезувати проточні частини елементів ГАС зі зниженим опором

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язані задачі:

1. Розроблено загальну схему методу удосконалення проточної частини елементів ГАС;
2. Розроблено засоби отримання кількісної оцінки стану ГП в проточній частині елемента, який удосконалюється
3. Розроблено засоби отримання якісної оцінки стану ГП в проточній частині елемента, який удосконалюється.
4. Розроблено методіку створення удосконаленої проточної частини елемента ГАС.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Загальна схема методу удосконалення проточної частини елементів ГАС.

На рисунку 1 показано загальну схему синтезу удосконаленої проточної частини елемента ГАС за допомогою розробленого методу фізичної моделі Як бачимо, метод удосконалення проточної частини елементів ГАС потребує виконання трьох етапів – отримання кількісної та якісної оцінок стану ГП в фізичній моделі проточної частини елемента, який удосконалюється та синтезу удосконаленої проточної частини елемента з їх врахуванням. Наведемо кратку характеристику дій за етапами методу.

Етап 1. Отримання *кількісної оцінки стану ГП* в проточній частині елемента ГАС, який удосконалюється. Для отримання кількісної оцінки на основі креслення проточної частини елемента (*element's flow path efp*) з урахуванням коефіцієнта масштабування *scale* виготовляється фізична модель проточної частини (*Physical model of the element's flow path $PMe fp$*) тобто $efp \cong PMe fp$. На експериментальному стенді в умовах подібності за числом Рейнольдса $10^4 \leq Re \leq 10^6$ турбулентних ГП проводиться симуляція функціонування *$PMe fp$* як елемента ГАС. Для заданих витрат робочого тіла Q_{GAS}^* вимірюються втрати тиску P_{GAS} і обчислюється значення гідроаеродинамічного опору $R_{PMe fp} = P_{GAS}/Q_{GAS}^{*2}$, яке потім порівнюється з нормативним опором R_{efp} аналізованого елемента ГАС. Якщо значення опору $R_{PMe fp}$ є більшими за нормативне R_{efp} переходимо до другого етапу $R_{efp} < R_{PMe fp}(R_{IPMe fp})$

Етап 2. Отримання *якісної оцінки стану ГП* в проточній системі елемента ГАС, який удосконалюється. Для визначення причин високих нормативних значень опорів $R_{PMe fp}$ за допомогою методу візуалізації дискретних структур потоку (МВДСП) [6], який належить до класу поляризаційно-оптичних методів візуалізації прозорих робочих тіл, отримують штучні поверхні розподілу інтенсивності (кольоровості) світла, які однозначно характеризують поле градієнтів швидкостей (тисків) ГП у *$PMe fp$* аналізованого елемента ГАС. Штучні поверхні фотореєструються, утворюючи множину значень інтенсивностей точок зображення – *візуальні дані ГП ($Data_{VE}$)*

Отримані таким чином візуальні дані ГП (див. рис. 3) разом з параметрами їх фотореєстрації записуються в базу даних ГП в аналізованих елементах ГАС. Для отримання *інтелектуальних даних* $Data_{IE}$ у $PMefp$ аналізованого елемента ГАС використовують попередньо навчену модель нейронної мережі Кохонена. Результатом її роботи є визначення номера K класу структурного примитива (елементарної частини $Data_{VE}$), який відображається псевдокольором Bk при формуванні $Data_{IE}$. Таким чином, $Data_{IE}$ є формалізованим описом стану ГП щодо візуалізації причин підвищених значень гідроаеродинамічних опорів в фізичній моделі проточної частини $PMefp$ аналізованого елемента ГАС. Ці дані зберігаються у також базі даних ГП.

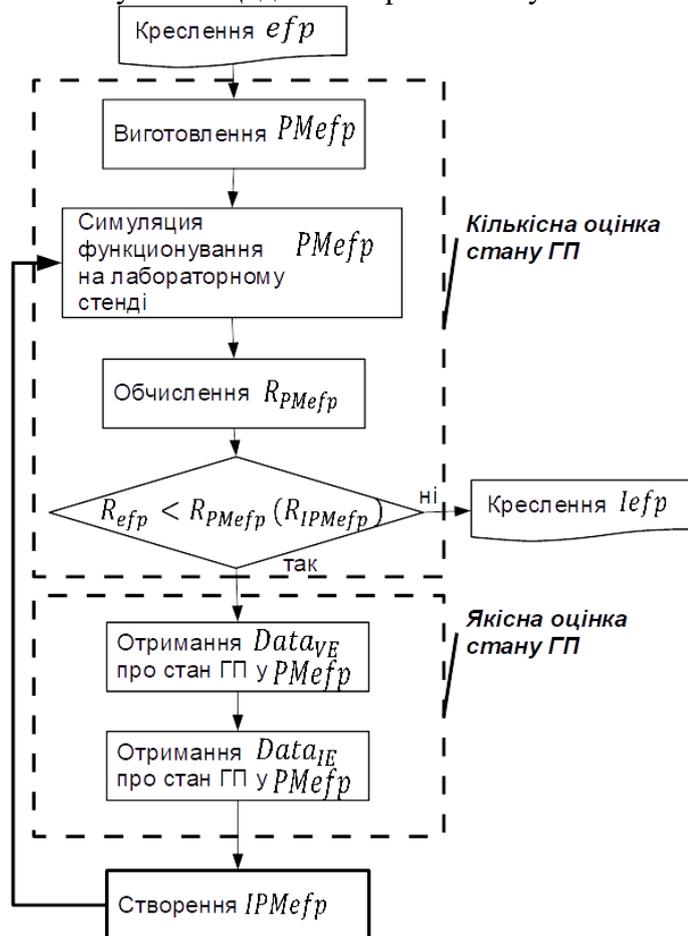


Рис. 1. Загальна схема методу удосконалення проточної частини елементів ГАС

Етап 3. Створення удосконаленої проточної частини елемента ГАС. З врахуванням отриманих $Data_{IE}$ у вигляді сегментованих зв'язаних областей, які утворюються оптично активними структурними примітивами «дисипативного» і «однорідного» класів з використанням попередньо навчених моделей багат шарового персерптрону та радіально-базисної нейронної мережі, які виконують функцію адаптивної апроксимації. В результаті заміщення оптично активних структурних примітивів дисипативного і однорідного класів оптично неактивними структурним примітивом класу «стінка» створюється удосконалена фізична модель проточної частини (Improved Physical model of the element's flow path $IPMefp$). Стан ГП у розробленій таким чином $IPMefp$ перевіряється на лабораторному стенді, тобто повертаємося до виконання дій за етапом 1. Якщо значення опору R_{IPMefp} є меншими або дорівнює нормативному R_{efp} тоді створюється креслення удосконаленої проточної частини елемента ГАС $lefp$.

2. Засоби отримання кількісної оцінки стану ГП в проточній частині елемента, який удосконалюється.

Засобами фізичного моделювання стану ГП в проточній частині елемента ГАС, який удосконалюється, є спеціально створені фізично подібні: за масштабом фізична модель проточної частини елемента $PMefp$; за умовами функціонування фізична модель ГАС, яку реалізовано у вигляді лабораторного стенду моделювання стану ГП. Лабораторний стенд (див. рис. 2) складається з: *пневматичної напірно-розподільної частини*, яка виконує функцію нагнітача ГАС і забезпечує ГП із заданими по числу Рейнольдса параметрами; *моделюючого пристрою* в якому розташовано $PMefp$; *системи управління*, яка складається із підсистем *моніторингу* технологічних параметрів, *освітлення* та *фото-відео реєстрації*.

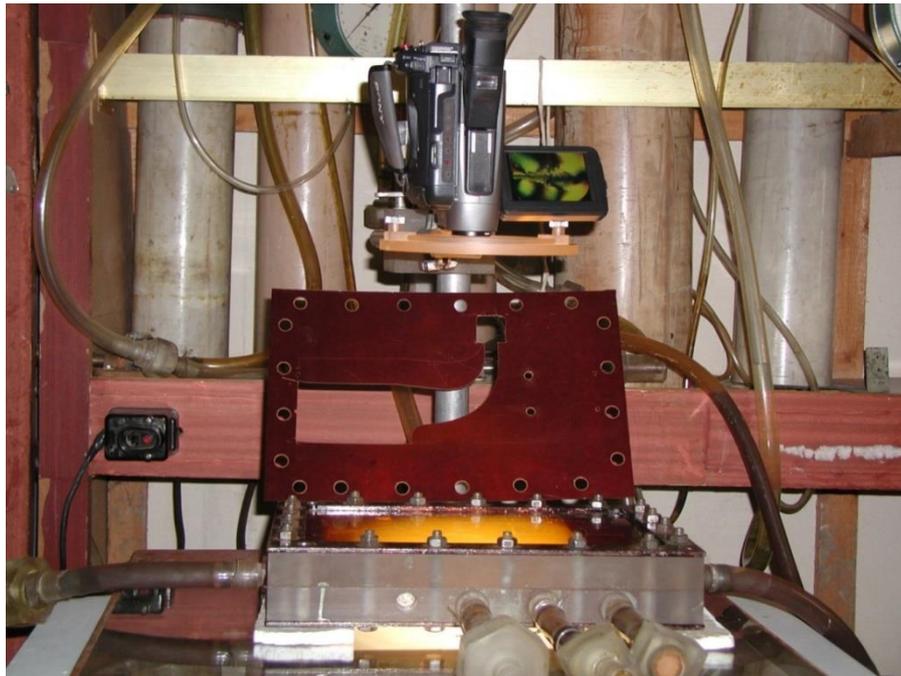


Рис. 2. Вигляд лабораторного стенду моделювання стану ГП фізичній моделі проточної частини елемента ГАС

Моделюючій пристрій (див. рис. 2) складається із двох плит з оптично неактивного скла між якими жорстко закріплюється лист гетинаксу з вирізаним (штампованим) каналом, який є $PMefp$, товщина плит обирається за умови забезпечення герметичності і сталості витрат робочого тіла (оптично-активної рідини) в $PMefp$ при заданих значеннях тиску.

Підсистема моніторингу технологічних параметрів стану ГП в ГАС, що моделюється за допомогою лабораторного стенду, реалізована у вигляді окремих модулів, які дозволяють отримати, передати та зберегти у цифровому вигляді значення часу, тиску P_{GAS} та витрат робочого тіла Q_{GAS}^* , що надходять від вимірювального обладнання напірно-розподільчої частині. Це, в свою чергу дозволяє розрахувати кількісну характеристику стану ГП в $PMefp$ у вигляді реального значення гідроаеродинамічного опору R_{PMefp} . Порівняння отриманої реальної оцінки R_{PMefp} з нормативною R_{efp} із бази елементів ГАС, яку сформовано на протязі багаторічних досліджень дозволяє зробити висновок про необхідність отримання якісної оцінки задля проведення подальших досліджень.

Підсистема освітлення лабораторного стенду (див. рис. 2) включає регульоване джерело освітлення та набір поляроїдів (поляризатор і аналізатор у вигляді прозорі

плівки, яка перетворює неполяризоване світло на лінійно поляризоване) для забезпечення просвічування оптично-активної рідини поляризованим світлом і набір керованих фільтрів для забезпечення рівномірного освітлення.

Підсистема фото-відео реєстрації лабораторного стенду (див. рис. 2) включає професійну фотокамеру 4 з високою роздільною здатністю та швидкістю реєстрації (кадр/сек) та набором знімних об'єктивів, а також засоби управління її позиціонуванням і наведенням.

Програмне забезпечення підсистем моніторингу, освітлення і фото-відео реєстрації реалізовано у вигляді окремих модулів та встановлено на сервер управління (комп'ютер), апаратне забезпечення підключено за допомогою зовнішніх інтерфейсів і працює під управлінням відповідних драйверів.

3. Засоби отримання якісної оцінки стану ГП в проточній частині елемента, який удосконалюється.

Візуальні дані про стан ГП є зображеннями штучних поверхонь розподілу інтенсивності освітленості (кольоровості), які однозначно характеризують поле градієнтів швидкостей (тисків) ГП в фізичному прототипі $GFPEminor_i$ допоміжного елемента. Динамічні штучні поверхні розподілу градієнтів швидкостей (тисків) ГП отримані шляхом використання методу візуалізації дискретних структур потоку (МВДСП) [6], який належить до класу поляризаційно-оптичних методів візуалізації прозорих робочих тіл на основі використання оптично активної рідини. Візуалізація за допомогою МВДСП виконується на основі просвічування поляризованим світлом оптично активної рідини у модельючому пристрої. Для отримання оптично активної рідини в рідину додається 0,06% п'ятиоксиду ванадію при цьому її в'язкість залишається незмінною. По різниці інтенсивності освітленості в кожній точці потоку можна судити про розподіл швидкостей/тисків, та, як наслідок, про фізичний стан ГП.

Отримані таким чином штучні поверхні фотореєструються, утворюючи множину значень інтенсивностей точок зображення (рис. 3 та 4,а) :

$$Data_{VE} = \{B_{ij}\}, (i = \overline{1, Dw}, j = \overline{1, Dh}), \quad (1)$$

де $Data_{VE}$ - візуальні дані ГП; B_{ij} – значення інтенсивності точки (піксела) зображення із координатами i та j .

При отриманні візуальних даних формується мета-заголовок $Data_{VE}$, який має наступний вигляд:

$$Meta_E = \langle Re, E, L, Dw, Dh, R_s, R_c \rangle, \quad (2)$$

де: Re – число Рейнольдса ($10^4 \leq Re \leq 10^6$) задає параметри ГП, що моделюється з урахуванням подібності його реальному процесу; E – витримка в діапазоні ($1/30 \div 1/2000$ сек); L – потужність освітлення в діапазоні ($25 \div 1000$ Вт); D_w – горизонтальний розмір зображення в точках (pixel); D_h – вертикальний розмір зображення в точках (pixel); R_s – просторова роздільна здатність в точках (pixel) на дюйм (ppi); R_c – кольорова роздільна здатність 1 або 3 байти. $Data_{VE}$ разом з мета-заголовком записуються в базу даних ГП в аналізованих елементах $PMefp$

Візуальні дані ГП $Data_{VE}$ представляють собою множину так званих візуальних структурних примітивів (СП) $Data_{VP}$ тобто елементарних, непохідних фрагментів даних ГП $Data_{VE}$, в якому забезпечується псевдостационарність ГП, що узгоджена з режимом отримання візуальних даних, який задається в мета-заголовку $Meta_{VE}$ (2). Тоді візуальні СП це множина значень в залежності від R_c (2) інтенсивності або кольоровості точок зображення:

$$Data_{VP} = \{B_{ij}\}, i = \overline{1, d_w}, j = \overline{1, d_h}, \quad (3)$$

де: d_w та d_h – горизонтальний та вертикальний розмір ГСП у пікселях, які визначаються експериментально та залежать від режиму отримання візуальних даних, який задано в (2).

Відображення візуальні СП $Data_{VP}$ в вихідний простір класів прототипів K процедури кластеризації візуальних даних $Data_{VP}$ заснований на застосуванні самоорганізованих карт Кохонена (self-organizing map – SOM) [16,17]. Внаслідок конкурентної самоорганізації вагові коефіцієнти нейронів обчислювального шару адаптуються так, щоб максимальним чином реагувати на схожі послідовності даних підобласті $Data_{VP_i}$ вхідного простору візуальних даних ГП $Data_{VE}$ і мінімальним на послідовності, що відрізняються. Таким чином формується простір класів, який дозволяє визначити схожі морфологічні типи візуальні СП $Data_{VP}$, які формують наступні класи (рис 3):

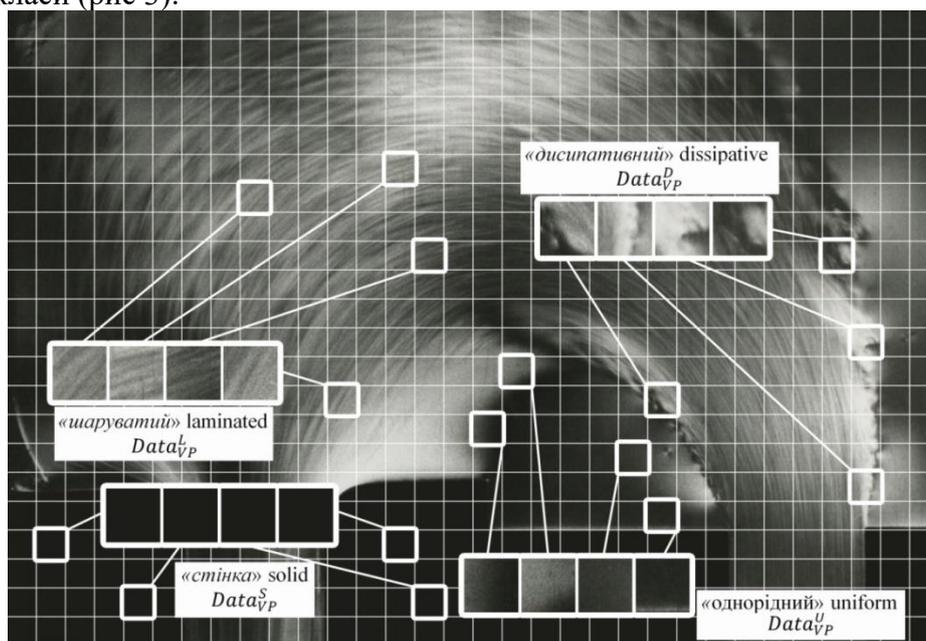


Рис. 3. Приклад візуальних даних про стан ГП в фізичній моделі проточної частини елемента «поворот потоку на 180°» із визначеними класами СП

- СП «стінка» (solid) (клас 4 – S) – тільні СП $Data_{VP}^S$, що відображають на зображенні ГП зону оптично неактивного каліброваного матеріалу (гетинаксу) фізичної моделі $PMefp$, яка є «нерухомою» та статистично однорідною;
- СП «потік» (flow) – поточкові СП, що відображають зону оптично активної рідини в фізичній моделі $PMefp$, яка характеризує зміну величини пульсаційної складової швидкості в поле потоку V свою чергу, поточкові ГСП розподілено на однорідні, дисипативні, шаруваті типи.
- СП «однорідний» (uniform) (клас 3- U) – псевдоорганізовані ГСП $Data_{VP}^U$, що представляють собою «нерухоме» оптично неоднорідне поле на зображенні, так званий стоячий потік в якому відсутня періодична зміна величини пульсаційної складової швидкості.
- СП «дисипативний» (dissipative) (клас 2- D) – дезорганізовані ГСП $Data_{VP}^D$, що представляють собою «рухоме» оптично неоднорідне поле на зображенні, в якому повністю відсутня організована (періодична) зміна величини пульсаційної складової швидкості в поле потоку.
- СП «шаруватий» (laminated) (клас 1- L) – впорядковані ГСП $Data_{VP}^L$, що представляють собою «рухоме» оптично неоднорідне поле на зображенні, яке

характеризує зміну величини пульсаційної складової швидкості в поле потоку у вигляді сімейства смуг (шарів), які чергуються.

Таким чином за допомогою процедури кластеризації візуальних даних $Data_{VP}$ заснований на застосуванні SOM були визначені, тільки СП $Data_{VP}^S$ та потокові СП, які в свою чергу розподілено на однорідні $Data_{VP}^U$, дисипативні $Data_{VP}^D$, шаруваті $Data_{VP}^L$ типи СП.

Інтелектуальні СП визначимо як:

$$Data_{IP} = \{Bk_{ij}\}, i = \overline{1, d_w}, j = \overline{1, d_h} \quad (4)$$

де: Bk_{ij} – значення псевдокольору точки (піксела) зображення з координатами , яке залежить від значення класу K з координатами i та j .

Для отримання $Data_{IP}$ створено одномірну топологію SOM, де рецепторний шар складається із 64 нейронів, а обчислювальний із 4 нейронів, які відповідають значенню чотирьох псевдокоleurів. Процедура відображення $Data_{VP}$ в вихідний простір реалізована наступним чином. На вхід рецепторного шару SOM послідовно подаються підобласті $Data_{VP_i}$ у вигляді вектору-рядку розміром 64, які формуються із зображень еталонних представників СП кожного із морфологічних типів ($Data_{VP_i}^S, Data_{VP_i}^U, Data_{VP_i}^D, Data_{VP_i}^L$). Результатом самоорганізації SOM відображення даних $Data_{VP_i}$ з у вихідний простір класів-прототипів K (клас 4 – S , клас 3 – U , клас 2 – D , клас 1 – L). Таким чином за рахунок самонавчання нейронної мережі формується простір ознак, який дозволяє визначити схожі морфологічні типи СП (див. рис 4,б та 4,в)

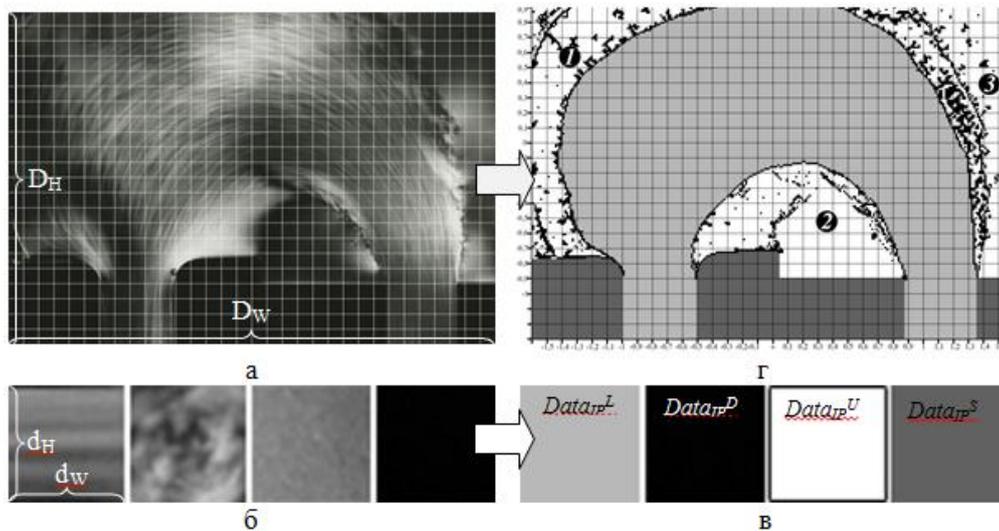


Рис. 4. Результати роботи SOM в режимі сегментації візуальних даних в фізичному прототипі допоміжного елемента «поворот потоку на 180°» (а – візуальні дані ГП, б, в – візуальні та інтелектуальні СП, г – інтелектуальні дані ГП

Процедура отримання інтелектуальних даних ГП $Data_{IE}$ в $PMefp$ реалізована за допомогою сформованої в режимі навчання SOM. На сформовану SOM подається вектор $v = f(Data_{VP})$ – одновимірний масив (вектор) візуальних даних $v_j, j = \overline{1, M}$ ($M_{VP} = d_w * d_h$), який отримано із двовимірного СП $Data_{VP}$ за допомогою перетворення $f: \langle d_w, d_h, \{B_{ij}\} \rangle \rightarrow \langle 1, M_{VP}, \{B_{ij}\} \rangle$. У якості функції f використовувались стандартні операції построчно-постовпцевої обробки або зигзаг-сканування.

У відповідності до алгоритму функціонування SOM виконується пошук найбільш схожого на вхідний вектор $v_j, j = \overline{1, M}$ вектора вагових коефіцієнтів нейронів $w_{ij}, i = \overline{1, L}$, та $j = \overline{1, M}$ у матриці вагових коефіцієнтів W . Нейроном-переможцем у відповідності до функції подібності буде нейрон $i(w_j)$, такий що:

$$i(w_j) = \arg \min_i \|v_j - w_j\|, \quad i = \overline{1, L_{SOM}}, \quad j = \overline{1, M_{VP}}. \quad (5)$$

При цьому номер нейрона-переможця відповідає номеру класу K інтелектуального СП $Data_{IP}$ у відповідності до якого виконується псевдокольорова розмітка сегментованого зображення. Отримане таким чином, псевдокольорове сегментоване зображення, яке представляє собою інтелектуальні ГП $Data_{IE}$, у вигляді об'єднаних $Data_{IE}$. (див. рис 4,г)

Практичне використання SOM в режимі сегментації візуальних даних в фізичній моделі $PMefp$ елемента «поворот потоку на 180°» (рис. 4) дозволяє виділити три зв'язаних області які утворено об'єднанням СП дисипативного $Data_{IP}^D$ і однорідного $Data_{IP}^U$ класів (рис. 4, в) в інтелектуальних даних ГП $Data_{IE}$ (рис. 4, г). На рисунку 4, г ці області позначено номерами 1,2 та 3.

4. Методика створення удосконаленої проточної частини елемента ГАС.

Для створення удосконаленої проточної частини елемента ГАС $Iefp$ (див. рис. 1) необхідно синтезувати його удосконалену фізичну модель $IPMefp$. Вхідними даними для створення $IPMefp$ є зображення інтелектуальних даних ГП $Data_{IE}$, на якому засобами попередніх етапів виділені зв'язані області 1, 2 та 3 (рис.4, г), що утворюються оптично активними СП дисипативного $Data_{IP}^D$ і однорідного $Data_{IP}^U$ класів. Фізична модель $IPMefp$ розробляється як результат заміщення трьох областей вставками складної форми, які утворені оптично неактивними СП $Data_{IP}^S$ класу стінка. (рис. 5 та 6)

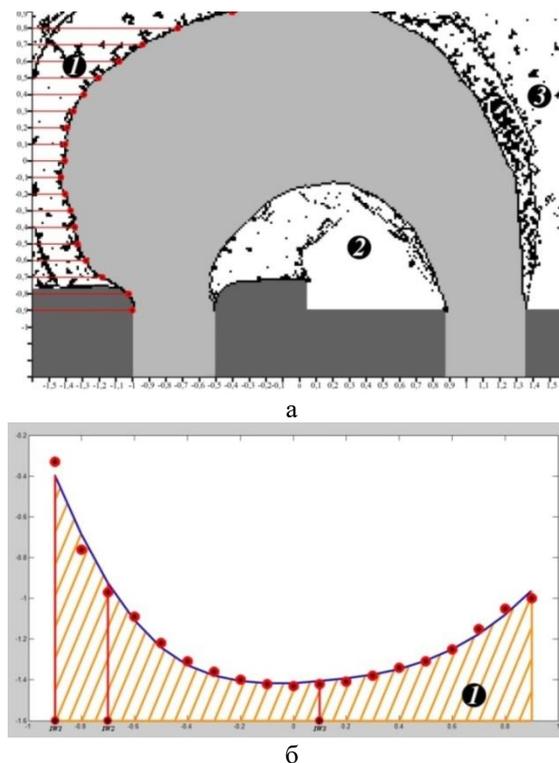


Рис. 5. Формування вхідних та даних для RBF_1 (а – масиви вхідних X і цільових T векторів; б – відображення цільових та вихідних даних та аргументів

Для отримання форми оптично неактивної вставки запропоновано використати радіальну базисну нейронну мережу (Radial Basis Function Network – RBF) тому, що вони демонструють хороші властивості, щодо апроксимації складних нелінійних функцій [18]. Мережа RBF містить шар прихованих нейронів з радіально симетричною активаційною функцією, кожен з яких призначений для зберігання окремого еталонного вектора у вигляді ваг прихованих нейронів і вихідний лінійний шар.

Апроксимація за допомогою мережі RBF називається локальною. Усе перетворення в цілому це сума локальних перетворень на основі базисних функцій (гауссоїд).

Навчання прихованого шару передбачає попереднє проведення кластеризації для знаходження еталонних векторів і рівня перекриття Вхідними аргументами для навчання RBF₁ є масиви вхідних X і цільових T векторів (рис. 5, а, б), що отримані відповідно до координат лінії яка розділює зв'язані області СП $Data_{IP}^D$ і $Data_{IP}^U$ класів та класу $Data_{VP_i}^L$. Масиви вхідних та цільових даних формуються з врахуванням координатної сітки яку спеціально нанесено на зображення. У відповідності із режимом навчання RBF₁ вхідними даними є також значення середньоквадратичної помилки мережі і рівня перекриття радіальних базисних функцій, які визначаються експериментально.

По аналогії із створенням оптично неактивної вставки для області 1 (рис. 5, а, б) з використанням RBF₂ та RBF₃ отримано форми оптично неактивних вставок для областей 2 та 3 (рис. 6, а) На рисунку 6, б показано синтезу удосконаленої фізичної моделі $IPMe_{fp}$ «поворот потоку на 180°» шляхом заміщення зв'язаних оптично активних невпорядкованих областей СП дисипативного $Data_{IP}^D$ і однорідного $Data_{IP}^U$ класів в інтелектуальних даних ГП $Data_{IE}$ зв'язаними областями, створеними оптично неактивними СП $Data_{IP}^S$ класу стінка. При цьому області заміщення позначено номерами 1, 2 та 3.

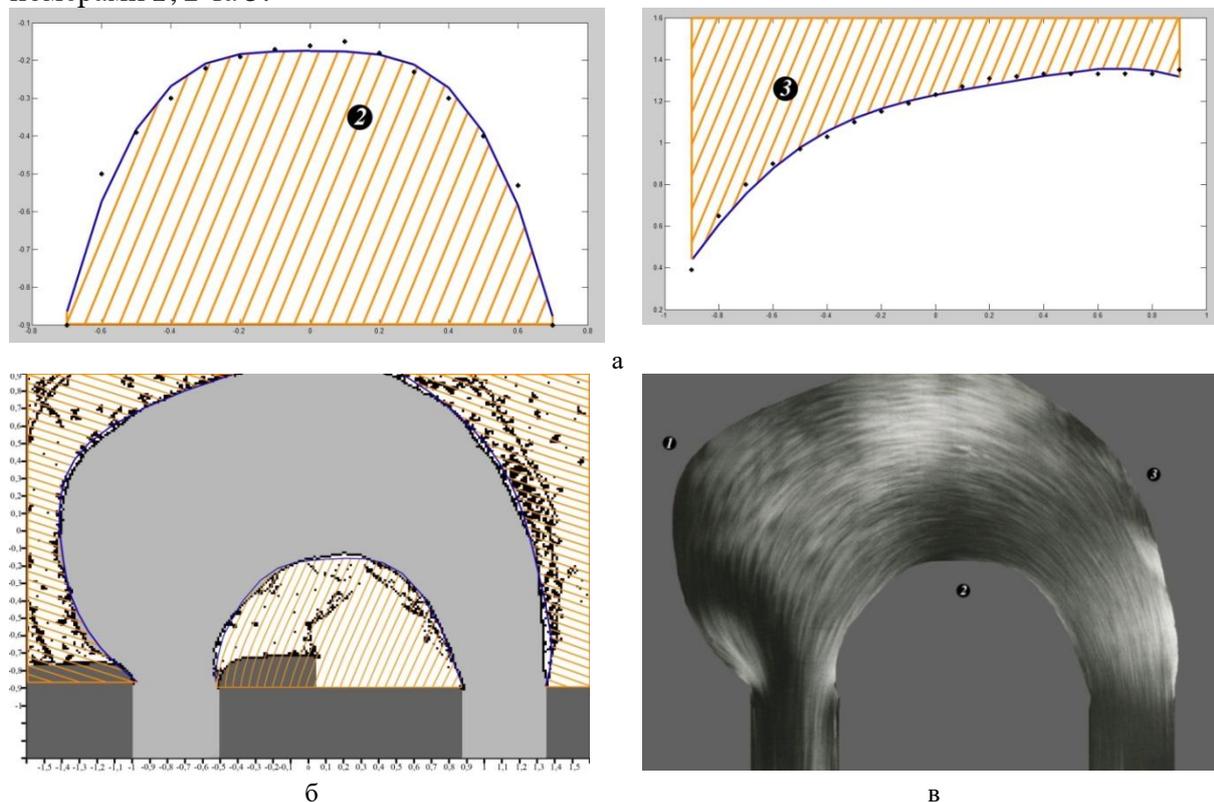


Рис. 6. Формування вхідних та даних RBF₂ та RBF₃ (а – масиви вхідних X і цільових T векторів; б – відображення цільових та вихідних даних та аргументів

Отримання кількісної оцінки стану ГП в синтезованій таким чином фізичної моделі $IPMe_{fp}$ на експериментальному стенді (див. рис. 1) у вигляді значення параметра гідро аеродинамічного опору $R_{IPMe_{fp}}$ і порівняння його з нормативним значенням R_{efp} показало, що практичну можливість зниження в 2,6 рази (з 0,040 до 0,015) значенням гідро аеродинамічного опору. Як бачимо із структурної схеми запропонованого методу в разі такого суттєвого зменшення значення опору $R_{IPMe_{fp}}$ на основі отриманої

IPMefp створюється креслення удосконаленої проточної частини елемента ГАС *Iefp*. для елемента «поворот потоку на 180°»

5 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Показано, що показників бажаної ефективності на енергетичних об'єктах на можливо досягти за рахунок зниження опорів в елементах гідро аеродинамічних систем, які забезпечують процеси підйому, стиснення, розширення і транспортування рідин та газів і тому є основними споживачами електричної енергії на так звані власні потреби. Що свою чергу потребує досліджень наукової візуалізації з використанням засобів фізичного та чисельного моделювання. Результатом таких досліджень є подальший розвиток методу удосконалення проточної частини елементів гідро та аеродинамічних систем, який полягає в отриманні кількісної та якісної оцінок стану газових потоків в цих елементах, що дозволяє синтезувати проточні частини елементів гідро аеродинамічних систем зі зниженим опором.

В роботі розроблено загальну схему методу удосконалення проточної частини елементів гідро аеродинамічних систем.

Показано, що реалізація методу потребує виконання трьох етапів а саме:

1. отримання кількісної оцінки стану газових потоків в проточній частині елемента, який удосконалюється за рахунок використання засобів фізичного моделювання;

2. отримання якісної оцінки стану газових потоків в проточній частині елемента, який удосконалюється за рахунок використання методу візуалізації їх структури з подальшим інтелектуальним аналізом отриманих візуальних зображень;

3. синтез удосконаленої проточної частини елемента гідро та аеродинамічних систем за рахунок використання нейронних мереж для побудови форми оптично неактивних вставок для заміщення виділених оптично активних областей отриманих як результат якісної оцінки візуальних зображень.

Симуляція створеної фізичної моделі удосконаленої проточної частини елемента гідро та аеродинамічних систем на подібному за числом Рейнольдса експериментальному стенді показала, що врахування стану газових потоків у вигляді інтелектуальних даних обробки візуальних поверхонь, які однозначно характеризують поле градієнтів швидкостей (тисків) потоку у моделі, дозволяє синтезувати проектні рішення по зниженню опорів в 2,6 рази (з 0,040 до 0,015) при удосконаленні проточної частини елемента «поворот потоку на 180°»

6 ВИСНОВКИ

В результаті аналізу проблем енергозбереження в гідро аеродинамічних системах, які проектуються встановлено, що існуючі методи не повною мірою враховують стан реальних газових потоків при прийнятті проектних рішень, щодо побудови проточних частин елементів таких систем. Це призводить до додаткових (біля 40 %) втрат енергії на підйом, стиснення або транспортування робочих тіл.

В свою чергу експериментальні дослідження запропонованого методу удосконалення проточної частини елемента гідро та аеродинамічних систем показали, що врахування оцінок стану гідро газових потоків (потоків робочих тіл) дозволяє розробити проектні рішення по зниженню опорів в 1,5 – 5 разів залежно від типу елемента, який проектується. [19,20]

В альтернативних роботах авторів показано, що практичне використання запропонованого методу для удосконалення проточної частини термостатичного клапану фірми Herz Armaturen, дозволило знизити його гідравлічний опір в 1,5 рази.

Використання розроблених енергозберігаючих проектних рішень щодо елементів в системах теплопостачання та аеродинамічних системах, що проектуються дозволило знизити енергоємність гідро аеродинамічних процесів в них відповідно на 25-30 % та 14 %. Запропоновані рішення також були використанні для проектування системи тепло- та тепловодопостачання на базі котла Е-2,5, енергоємність гідродинамічного процесу якої на 15 % нижче від подібних існуючих.

Наведені позитивні приклади використання запропонованого методу удосконалення проточної частини елемента гідро та аеродинамічних систем свідчать про його науково-практичну користь.

7 ПОДЯКИ

Автори статті висловлюють подяку кафедрі аеродинаміки, електроенергетики та енергетики Технологічного інституту аеронавтики, Сан-Жозе-дус-Кампус, Сан-Франциско, Бразилія, за підтримку цього дослідження.

8 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Автори статті не мають відповідних фінансових чи нефінансових інтересів, про які можна було б повідомити.

Література

1. А. Е. . Denysova, V. R. . Nikulshin, V. V. . Wysochin, O. S. Zhaivoron, і Y. V. . Solomentseva, «Моделювання ефективності енергетичних систем з резервуванням потужності за рахунок відновлювальних джерел енергії», ВСІТ, вип. 4, вип. 4, с. 318-328, Бер 2021
2. I.I. Andrianova I. I., Arsiryi, V.A. Economic analysis of Energy- and Resource-saving innovations for thermal power 12 (2010) 33-44 <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84927767143&partnerID=MN8TOARS>
3. Möller, Torsten & Hamann, Bernd & Russell, Robert. (2009). Mathematical foundations of scientific visualization, computer graphics, and massive data exploration. Papers based on the presentations at the workshop, Banff, Canada, May 22–27, 2004. 10.1007/b106657
4. Бучинський М. Я., Горик О. В., Чернявський А. М., Яхін С. В. ОСНОВИ ТВОРЕННЯ МАШИН / [За редакцією О. В. Горика, доктора технічних наук, професора, заслуженого працівника народної освіти України]. — Харків: Вид-во «НТМТ», 2017. — 448 с. : 52 іл. ISBN 978-966-2989-39-7
5. Album of liquid and gas flows / [ed. M. Van Dyke] Department of Mechanical Engineering Stanford University <https://courses.washington.edu/me431/handouts/Album-Fluid-Motion-Van-Dyke.pdf>
6. PST 5.812.423 USA Method of determining for working media motion and designing flow structures for same // Maisotsenko V. S., Arsiri V. A.. Publ. 22.09.1998.
7. V. Arsiri, O. Kravchenko, Reconstruction of turbomachines on the basis of the flow structure visual diagnostics, International Journal Mechanics and Mechanical Engineering, vol. 22. num. 2, (2018) 397-404. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85056601617&partnerID=MN8TOARS>
8. Потетенко О. В., Дранковський В. Е., Крупа Є. С. Чисельне дослідження просторового потоку в проточній частині капсульного гідроагрегату з допомогою програмного комплексу FlowVision. Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units. Kharkiv: NTU "KhPI". 2013. No. 14 (988). P. 72–78.
9. Rezvaya K., Krupa E., Drankovskiy V., Potetenko O., Tynyanova I. The numerical reseach of the flow in the inlet of the high-head hydraulic turbine. Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solution in modern technologies. Kharkiv: NTU "KhPI". 2017. No. 7 (1229). P. 97–102. doi: 10.20998/2413-4295.2017.07.13

10. Pankaj G., Rajeshwer S. Numerical Study of Cavitation in Francis Turbine of a Small Hydro Power Plant. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2016. No. 9 (1). P. 357–365. doi: 10.18869/acadpub.jafm.68.224.24080
11. Rusanov A., Rusanov R., Lampart P., Designing and updating the flow part of axial and radial-axial turbines through mathematical modeling. *Open Engineering*. 2015. Vol. 5. P. 399–410. 16.
12. Duan X. H., Kong F. Y., Liu Y. Y., Zhao R. J., Hu Q. L. The numerical simulation based on CFD of hydraulic turbine pump. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 129. 2016
13. Аpcіпій, О. О. (2013). Developing of hydro-aerodynamic systems' elements based on intellectual visualization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(8(63), 4–8. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2013.14826>
14. E.A. Arsiri, C.G. Antoshchuk, V.A. Arsiri, V.I. Kravchenko, Intellectualnyi analiz pri kompleksnom modelirovanii dlya povysheniya nadejnosti raboty energeticheskogo oborudovaniya, Radioelektronni i komp'yuterni systemy. *Kharkivskiy aviaciyniy instytut*, 6(58), (2012) 89 – 95. <http://nti.khai.edu:57772/csp/nauchportal/Arhiv/REKS/2012/REKS612/Arsiriy.pdf>
15. O.S. Maniakaeva, E.A. Arsiri, A.P. Vasilevskaya, Development of the decision support subsystem in the systems of neural network pattern recognition by statistical information. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(4(78), (2015) 4–12. doi:10.15587/1729-4061.2015.56429
16. T. Kohonen. *The self-organizing map / Neural Networks: Theoretical foundations and analysis/* Edited by Clifford G. Y. Lau. New York. IEEE Press. – 1992
17. Yin, Hujun. (2008). *The Self-Organizing Maps: Background, Theories, Extensions and Applications*. 10.1007/978-3-540-78293-3_17
18. Friedhelm Schwenker, Hans A. Kestler, Günther Palm, Three learning phases for radial-basis-function networks, *Neural Networks*, Volume 14, Issues 4–5, 2001, Pages 439-458, ISSN 0893-6080, [https://doi.org/10.1016/S0893-6080\(01\)00027-2](https://doi.org/10.1016/S0893-6080(01)00027-2)
19. Vasyl Arsirii The influence of the structure of laminar flows on the characteristics of equipment // Vasyl Arsirii, Oleg Kravchenko, Bohdan Savchuk and Olena Arsirii / 26th Scientific Conference on Power Engineering and Power Machines (PEPM'2021)/ 22. 11. 2021 p. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132705003>
20. Arsiri E. The physical method of visual diagnostics of flow structure / E. Arsiri, V. Arsiri // XII Intern. Sc. Conf. Current Issues of Civil and Environmental Eng., Rzeszow–Lviv–Kosice. September 17–19, 2009. – Rzeszow, Poland. – Vol. 54, № 266. – P. 5 – 8.

References

1. Е. . Denysova, V. R. . Nikulshin, V. V. . Wysochin, O. S. Zhaivoron, i Y. V. . Solomentseva, «Модельовання ефективності енергетичних систем з резервуванням потужності за рахунок відновлювальних джерел енергії», ВСІТ, вип. 4, вип. 4, с. 318-328, Бер 2021
2. I.I. Andrianova I. I., Arsiri, V.A. Economic analysis of Energy- and Resource-saving innovations for thermal power 12 (2010) 33-44 <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84927767143&partner ID=MN8TOARS>
3. Möller, Torsten & Hamann, Bernd & Russell, Robert. (2009). *Mathematical foundations of scientific visualization, computer graphics, and massive data exploration. Papers based on the presentations at the workshop, Banff, Canada, May 22–27, 2004*. 10.1007/b106657
4. Бучинський М. Я., Горик О. В., Чернявський А. М., Яхін С. В. ОСНОВИ ТВОРЕННЯ МАШИН / [За редакцією О. В. Горика, доктора технічних наук, професора, заслуженого працівника народної освіти України]. — Харків: Вид-во «НТМТ», 2017. — 448 с. : 52 іл. ISBN 978-966-2989-39-7
5. *Album of liquid and gas flows / [ed. M. Van Dyke] Department of Mechanical Engineering Stanford University* <https://courses.washington.edu/me431/handouts/Album-Fluid-Motion-Van-Dyke.pdf>
6. PST 5.812.423 USA Method of determining for working media motion and designing flow structures for same // Maisotsenko V. S., Arsiri V. A.. Publ. 22.09.1998

7. V. Arsiri, O. Kravchenko, Reconstruction of turbomachines on the basis of the flow structure visual diagnostics, *International Journal Mechanics and Mechanical Engineering*, vol. 22. num. 2, (2018) 397-404. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85056601617&partnerID=MN8TOARS>
8. Потетенко О. В., Дранковський В. Е., Крупа Є. С. Чисельне дослідження просторового потоку в проточній частині капсульного гідроагрегату з допомогою програмного комплексу FlowVision. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2013. No. 14 (988). P. 72–78.
9. Rezvaya K., Krupa E., Drankovskiy V., Potetenko O., Tynyayanova I. The numerical reseach of the flow in the inlet of the high-head hydraulic turbine. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solution in modern technologies*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2017. No. 7 (1229). P. 97–102. doi: 10.20998/2413-4295.2017.07.13
10. Pankaj G., Rajeshwer S. Numerical Study of Cavitation in Francis Turbine of a Small Hydro Power Plant. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2016. No. 9 (1). P. 357–365. doi: 10.18869/acadpub.jafm.68.224.24080
11. Rusanov A., Rusanov R., Lampart P., Designing and updating the flow part of axial and radial-axial turbines through mathematical modeling. *Open Engineering*. 2015. Vol. 5. P. 399–410. 16.
12. Duan X. H., Kong F. Y., Liu Y. Y., Zhao R. J., Hu Q. L. The numerical simulation based on CFD of hydraulic turbine pump. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 129. 2016
13. Arcipiiy, O. O. (2013). Developing of hydro-aerodynamic systems' elements based on intellectual visualization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(8(63), 4–8. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2013.14826>
14. E.A. Arsiri, C.G. Antoshchuk, V.A. Arsiri, V.I. Kravchenko, Intellectualnyi analiz pri kompleksnom modelirovanii dlya povysheniya nadejnosti raboty energeticheskogo oborudovaniya, *Radioelektronni i komp'yuterni systemy*. Kharkivskiy aviaciyniy instytut, 6(58), (2012) 89 – 95. <http://nti.khai.edu:57772/csp/nauchportal/Arhiv/REKS/2012/REKS612/Arsiriy.pdf>
15. O.S. Maniakaeva, E.A. Arsiri, A.P. Vasilevskaya, Development of the decision support subsystem in the systems of neural network pattern recognition by statistical information. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(4(78), (2015) 4–12. doi:10.15587/1729-4061.2015.56429
16. T. Kohonen. *The self-organizing map / Neural Networks: Theoretical foundations and analysis/* Edited by Clifford G. Y. Lau. New York. IEEE Press. – 1992
17. Yin, Hujun. (2008). *The Self-Organizing Maps: Background, Theories, Extensions and Applications*. 10.1007/978-3-540-78293-3_17
18. Friedhelm Schwenker, Hans A. Kestler, Günther Palm, Three learning phases for radial-basis-function networks, *Neural Networks*, Volume 14, Issues 4–5, 2001, Pages 439-458, ISSN 0893-6080, [https://doi.org/10.1016/S0893-6080\(01\)00027-2](https://doi.org/10.1016/S0893-6080(01)00027-2).
19. Vasyl Arsirii The influence of the structure of laminar flows on the characteristics of equipment // Vasyl Arsirii, Oleg Kravchenko, Bohdan Savchuk and Olena Arsirii / 26th Scientific Conference on Power Engineering and Power Machines (PEPM'2021)/ 22. 11. 2021 p. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132705003>
20. Arsirii E. The physical method of visual diagnostics of flow structure / E. Arsirii, V. Arsiry // XII Intern. Sc. Conf. Current Issues of Civil and Environmental Eng., Rzeszow–Lviv–Kosice. September 17–19, 2009. – Rzeszow, Poland. – Vol. 54, № 266. – P. 5 – 8.

Арсірій Василь Анатолійович

Одеська державна академія будівництва та архітектури,
д.т.н., професор
вул. Дідріхсона, 4 Одеса, Україна, 65029
vasily.arsiry@gmail.com
ORCID: 0000-0003-3617-8487

Крошка Олександр Вікторович

Одеська державна академія будівництва та архітектури,
аспірант
вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029
Kolvi@epg.kolvi.com
ORCID: 0000-0003-0975-3079

Для посилань:

Арсирій В. А., Крошка О. В. Метод удосконалення проточних частин елементів енергетичних систем житлових комплексів. Механіка та математичні методи, 2024. Т. VI. №. 1. с. 57–73.

For references:

V. Arsiirii, O. Kroshka. (2024). Improvement metod of flow parts of energy system elements of residential complexes. Mechanics and Mathematical Methods. VI (1). 57–73.

УДК 621.01

ФУНДАМЕНТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ (МІНІМІЗАЦІЯ) ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ У ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТАХ МЕХАНІЗМІВ ПІДЙОМУ ВАНТАЖУ КРАНІВ

Частина I

Човнюк Ю. В.¹, Приймаченко О. В.¹, Чередніченко П. П.¹,
Турчанінова Л. І.¹, Шудра Н. С.¹

¹Київський Національний університет будівництва та архітектури

Анотація. Проведений фундаментальний аналіз та оптимізація (мінімізація) динамічних навантажень у пружних елементах (канатах) механізмів підйому вантажу кранів, які використовуються у містобудуванні. Основою аналізу та методики оптимізації режимів руху вказаних механізмів є підхід, який реалізований у класичному варіаційному численні, а саме: мінімізується інтегральний функціонал, котрий відображає небажані властивості механічної системи. Оптимізовані режими руху механізму підйому вантажу крану, який представлений у роботі механічною системою з лінійною функцією положення її елементів (вантаж на канаті й привідний механізм). Показаний суттєвий вплив режимів руху саме привідних механізмів на динамічні навантаження в пружних елементах (канатах) механізму підйому вантажу містобудівельного крану. Зазвичай окремі типові режими руху оптимізують тільки одну певну властивість вказаного механізму. У багатьох практичних випадках потрібно обрати режими руху, які оптимізують комплекс властивостей машини чи механізму (відповідно, крану або механізму підйому вантажу містобудівельного крану). Саме для вибору таких режимів руху машин і механізмів потрібні динамічні критерії їхньої оцінки. Усі існуючі критерії оцінки машин і механізмів умовно можна розділити на два класи: 1) позиційні (максимальні значення кінематичних характеристик ланок, динамічних навантажень, амплітуд і частот коливань, коефіцієнтів динамічності тощо); 2) інтегральні (середньоквадратичні за час руху значення кінематичних характеристик ланок і динамічних навантажень, енергетичні витрати і тому подібне). У роботі проведений фундаментальний аналіз вказаних критеріїв і показано, що для оцінки режимів руху вантажопідйомних машин, як і механізмів підйому вантажу кранів (стрілових, мостових, козлових, містобудівельних) необхідно використовувати інтегральні критерії, оскільки саме вони оцінюють рух протягом усього циклу. Наведені інтегральні критерії оцінки містобудівельних кранів і механізмів підйому вантажу, які у повній мірі відображають їхні динамічні властивості, характеристики руху і, зокрема, мінімізують динамічні навантаження на пружні елементи (канати).

Отримані у даному дослідженні результати можуть бути у подальшому використанні для уточнення й вдосконалення існуючих інженерних методів розрахунку вантажопідйомних кранів, котрі використовуються у містобудуванні, а також їх механізмів підйому вантажу, як на стадіях проектування, так і у режимах реальної експлуатації.

Ключові слова: фундаментальний аналіз, оптимізація, динамічні навантаження, пружні елементи, механізми підйому вантажу, містобудівельні крани, режими руху, динамічні критерії.

FUNDAMENTAL ANALYSIS AND OPTIMIZATION (MINIMIZATION) OF DYNAMIC LOADS IN ELASTIC ELEMENTS OF CRANES LOAD LIFTING MECHANISMS

Part I

Yu. Chovniuk¹, O. Priymachenko¹, P. Cherednichenko¹, L. Turchaninova¹,
N. Shudra¹

¹ Kyiv National University of Construction and Architecture

Annotation. The fundamental analysis and optimization (minimization) of dynamic loads in elastic elements (ropes) of load lifting mechanisms of cranes used in urban development is carried out. The basis of the analysis and methodology of optimization of motion modes of the mentioned mechanisms is the approach implemented in the classical calculus of variations, namely: the integral functional is minimized, which reflects undesirable properties of the mechanical system. Optimized modes of motion of the crane load lifting mechanism, which is represented in the paper by a mechanical system with a linear function of the position of its elements (the load on the rope and the drive mechanism). The significant influence of motion modes of exactly drive mechanisms on dynamic loads in elastic elements (ropes) of the load lifting mechanism of a city-building crane is shown. Usually separate typical modes of motion optimize only one certain property of the specified mechanism. In many practical cases, it is necessary to select modes of motion that optimize a set of properties of a machine or mechanism (respectively, a crane or a load lifting mechanism of a city-building crane). It is for the selection of such modes of motion of machines and mechanisms that dynamic criteria for their evaluation are needed. All existing criteria for evaluating machines and mechanisms can be conditionally divided into two classes: 1) positional (maximum values of kinematic characteristics of links, dynamic loads, amplitudes and frequencies of oscillations, dynamics coefficients, etc.); 2) integral (rms values of kinematic characteristics of links and dynamic loads, energy costs, etc.). In the work the fundamental analysis of the mentioned criteria is carried out and it is shown that for estimation of motion modes of hoisting machines, as well as mechanisms of cargo lifting cranes (boom, bridge, gantry, city cranes) it is necessary to use integral criteria, because they are the ones that estimate motion during the whole cycle. Integral criteria for evaluating urban construction cranes and load lifting mechanisms are presented, which fully reflect their dynamic properties, motion characteristics and, in particular, minimize dynamic loads on elastic elements (ropes).

The results obtained in this study can be further used to clarify and improve the existing engineering methods of calculation of hoisting cranes used in urban planning, as well as their load lifting mechanisms, both at the design stages and in the modes of proper operation.

Keywords: fundamental analysis, optimization, dynamic loads, elastic elements, load lifting mechanisms, urban cranes, motion modes, dynamic criter.

1 ВСТУП

Відомо [1], що характер руху основних ланок механізмів підйому вантажу містобудівельних кранів, як і інших вантажопідйомних машин суттєво впливає на якість виконання технологічних процесів власне машиною, її продуктивність, надійність, довговічність тощо.

Режим руху кожної ланки механізму підйому вантажу, у свою чергу, визначається законом зміни у часі або положенні кінематичних характеристик (переміщень, швидкостей і так далі) і часом руху механічної системи. Для певної конкретної конструкції механізму підйому вантажу крану закон руху окремої ланки (наприклад, приводу) визначає закон руху інших ланок. Зауважимо, що повний час руху механізму підйому вантажу містобудівельного крану (як механізму циклічної дії) – це проміжок часу від моменту початку руху до його кінця.

При проектуванні вантажопідйомних машин (зокрема, кранів різної конструкції) й вантажопідйомних механізмів зазвичай використовуються різні типові режими руху: 1) зі сталою швидкістю; 2) зі сталим пришвидшенням; 3) зі змінним у часі пришвидшенням за лінійним, косинусоїдальним, синусоїдальним, поліноміальним та іншими законами [2]. Кожний з цих режимів руху оптимізує ті чи інші властивості механізмів з лінійною функцією положення провідної ланки відносно веденої. Слід також зазначити, що окремі типові режими руху оптимізують лише одну конкретну властивість механізму підйому вантажу містобудівельного крану.

Для вибору режимів руху подібних механізмів і машин необхідні узагальнені критерії оцінки їхньої ефективної роботи. Існують критерії оцінки вантажопідйомних машин і механізмів, які умовно можна розділити на два класи [1-3]: 1) позиційні (максимальні значення кінематичних характеристик ланок, динамічних навантажень, амплітуд і частот коливань, коефіцієнтів динамічності тощо); 2) інтегральні (середньоквадратичні за час руху значення кінематичних характеристик ланок і динамічних навантажень, енергетичні витрати і тому подібне). Фундаментальний аналіз цих критеріїв показує, що для оцінки режимів руху вантажопідйомних машин і механізмів слід використовувати саме інтегральні критерії, оскільки вони більш адекватно оцінюють рух механічних систем подібної структури й функціонального призначення протягом усього циклу (як і при перехідних процесах типу: розгін, гальмування, реверсування). Проте існуючі інтегральні критерії оцінки роботи вантажопідйомних машин і механізмів, на думку авторів даного дослідження, у неповній мірі відображають їхні динамічні властивості, характеристики руху, відсутні фізичні причини появи руху у механічній системі (при розгляді перехідних процесів), а початкові та кінцеві умови (термінальні умови), які необхідно виконати при моделюванні таких систем носять відсторонений, фізично ніяким чином не обґрунтований характер і вид. Тому виникає нагальна потреба у розробці нових динамічних критеріїв та фундаментальному аналізі режимів роботи (та їх оптимізації з точки зору мінімізації навантажень на пружні елементи (канати) вантажопідйомних механізмів містобудівельних кранів) з урахуванням науково обґрунтованих умов руху, які б задовольняли існуючим законам механіки (зокрема, першому та другому закону І. Ньютона).

Зміст даного дослідження і зводиться до вирішення окреслених вище проблем.

Слід зазначити, що режими руху механізмів вантажопідйомних кранів – це, по суті, функціональні залежності переміщень, швидкостей, пришвидшень тощо, ланок механізму від просторового і часового аргументів протягом усього циклу руху, а сам критерій оптимальності має вигляд інтегрального функціонала. Умова, за якої процедура порівняння допустимих режимів руху можлива, зводиться до того, що

вказаний критерій повинен виражатись скалярною величиною, а також для кожного режиму руху механічної системи набувати конкретного числового значення. Якщо залежності режимів руху вантажопідйомних механізмів містобудівельних кранів можуть набувати як додатних так і від'ємних значень, тоді у вирази підінтегральних функцій вони мають входити у квадратичному вигляді й відображати інерційні властивості конкретних ланок. Зокрема, підінтегральні функції критеріїв повинні включати всі силові фактори, діючі у механічній системі (інерційні, сили опору, ваги, пружні сили тощо), оскільки вони діють на елементи вантажопідйомного механізму й, у свою чергу, залежать від режимів руху.

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У роботах [1-3] була представлена методика оптимізації режимів руху машин і вантажопідйомних механізмів кранів різних конструкцій та типів, яка базується на мінімізації інтегральних функціоналів, котрі відображають небажані властивості подібних механічних систем. Автори цитованих робіт оптимізували режими руху конкретних механічних систем, зокрема, з лінійною функцією положення елементів (механізмів вантажопідйомних машин) й показали, що існує суттєвий вплив режимів руху привідних механізмів на динамічні навантаження у пружних елементах (канатах) механізму підйому вантажу. У подальшому, автори [4-10] досліджень розробили методику оптимізації режимів руху вантажопідйомних механізмів (мостових, козлових, стрілових та інших) кранів. Проте у названих роботах, як і у [1-3], необґрунтовані фізичні причини виникнення руху у таких системах, а термінальні умови, тут введені, не є адекватними реальній ситуації, що виникає. Тому необхідно переглянути, доповнити ці умови й розробити нові динамічні критерії для подібних систем, які функціонують у реальних умовах експлуатації.

3 ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета роботи полягає у обґрунтуванні методу аналізу та оптимізації (мінімізації) динамічних навантажень у пружних елементах механізмів підйому вантажу кранів, які використовуються у містобудуванні.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Розглянемо вплив режиму пуску на динамічні навантаження, які виникають у одному з пружних елементів механізму підйому, наприклад, канаті. Для цього у першому наближенні використаємо двомасову динамічну модель механізму підйому крана (рис.1). На цьому рисунку прийняті такі позначення: m , m_1 – зведені до підйомного каната маси відповідно вантажу і приводного механізму з барабаном; X , X_1 – узагальнені координати відповідно мас m і m_1 ; F_1 та F_2 – рушійна сила приводу і вага вантажу, зведені до вантажного каната; C – жорсткість каната.

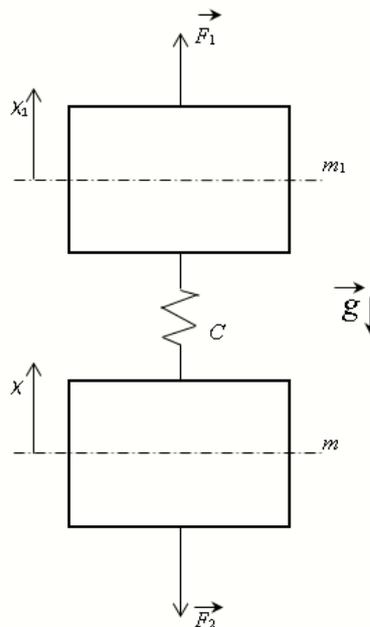


Рис. 1. Двомасова динамічна модель механізму підйому крана

Рівняння руху розглянутої системи (моделі механізму підйому вантажу містобудівельним краном) мають вигляд:

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{x}_1 = F_1 - c \cdot (x_1 - x); \\ m \cdot \ddot{x} = C \cdot (x_1 - x) - F_2. \end{cases} \quad (1)$$

Подамо систему диференціальних рівнянь (1) у наступному вигляді:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 = \frac{F_1}{m_1} - \frac{C}{m_1} \cdot (x_1 - x); \\ \ddot{x} = \frac{C}{m} \cdot (x_1 - x) - \frac{F_2}{m}. \end{cases} \quad (2)$$

Віднімемо від першого рівняння системи (2) друге диференціальне рівняння цієї системи і введемо заміну змінних:

$$x_1 - x = \xi. \quad (3)$$

Тоді матимемо:

$$\ddot{\xi} + k^2 \cdot \xi = \frac{F_1}{m_1} + \frac{F_2}{m}, \quad k^2 = C \cdot \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m} \right). \quad (4)$$

На відміну від підходу роботи [1] у подальшому для ξ аналізуватимемо рівняння другого порядку (похідні по часу t фігурують у (4) лише другого порядку). При $(F_1, F_2) = const$, рівняння (4) має наступний розв'язок:

$$\xi(t) = C_1 \cdot \sin kt + C_2 \cdot \cos kt + \frac{1}{k^2} \cdot \left\{ \frac{F_1}{m_1} + \frac{F_2}{m} \right\}. \quad (5)$$

Оскільки у початковий момент часу ($t = 0$) маємо:

$$x_1|_{t=0} = x|_{t=0} = 0; \quad \dot{x}_1|_{t=0} = \dot{x}|_{t=0} = 0 \Leftrightarrow \xi|_{t=0} = \dot{\xi}|_{t=0} = 0. \quad (6)$$

За таких початкових умов (6) для розв'язку (5) легко визначити константи C_1 та C_2 :

$$C_1 = 0; \quad C_2 = -\frac{1}{k^2} \cdot \left\{ \frac{F_1}{m_1} + \frac{F_2}{m} \right\}. \quad (7)$$

Тоді розв'язок (5) набуває вигляду:

$$\xi(t) = \frac{1}{k^2} \cdot \left(\frac{F_1}{m_1} + \frac{F_2}{m} \right) \cdot (1 - \cos kt) = \frac{1}{k^2} \cdot \left(\frac{F_1}{m_1} + \frac{F_2}{m} \right) \cdot 2 \cdot \sin^2 \left(\frac{kt}{2} \right). \quad (8)$$

При цьому, пружна сила, яка виникає у канаті в процесі пуску механізму підйому вантажу містобудівного крана приймає наступний вид:

$$F_{np.} = C \cdot \xi(t) = \frac{C}{k^2} \cdot \left(\frac{F_1}{m_1} + \frac{F_2}{m} \right) \cdot 2 \cdot \sin^2 \left(\frac{kt}{2} \right). \quad (9)$$

З урахуванням значення k^2 з (4) маємо:

$$F_{np.} = \frac{2}{\left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m} \right)} \cdot \left(\frac{F_1}{m_1} + \frac{F_2}{m} \right) \cdot \sin^2 \left(\frac{kt}{2} \right). \quad (10)$$

Максимального значення $F_{np.}(t)$ набуває у момент часу:

$$\frac{k \cdot t_n}{2} = \frac{\pi}{2} \cdot (2n - 1), \quad n \in N, \Leftrightarrow t_n = \frac{\pi}{k} \cdot (2n - 1), \quad n \in N. \quad (11)$$

При цьому:

$$F_{np.}^{(max)} = F_{np.}(t)|_{t=t_n} = 2 \cdot \left(\frac{F_1 \cdot m}{m + m_1} + \frac{F_2 \cdot m_1}{m + m_1} \right). \quad (12)$$

Подібні до (12) перевантаження канатної системи містобудівного крана можуть привести до її руйнування і, у подальшому, навіть до аварії.

З'ясуємо, яким повинен бути закон руху даної системи ($\xi(t)$), за якого за термін часу $t \in (0; \tau_{II})$, де τ_{II} – тривалість у часі пуску механізму підйому вантажу, $F_{np.}(t)$ набуло б мінімальних значень, що і дозволяє уникнути аварійних ситуацій у канатній системі.

Для цього шуканий закон руху ($\xi(t)$) системи повинен задовольняти наступному критерію якості такого руху:

$$I = \int_0^{\tau_{II}} (C \cdot \xi)^2 dt \Rightarrow \min. \quad (13)$$

З рівняння (4) маємо:

$$C \cdot \xi = \frac{C}{k^2} \cdot \left(\frac{F_1}{m_1} + \frac{F_2}{m} \right) - \frac{C \cdot \ddot{\xi}}{k^2}. \quad (14)$$

Тоді критерій якості руху системи зведеться до наступного (замість (13)):

$$I = \int_0^{\tau_{II}} \left\{ \frac{C}{k^2} \cdot \left(\frac{F_1}{m_1} + \frac{F_2}{m} \right) - \frac{C \cdot \ddot{\xi}}{k^2} \right\} dt \Rightarrow \min. \quad (15)$$

$$I = \left\{ \frac{1}{\tau_{II}} \cdot \int_0^{\tau_{II}} \left[c \cdot \left(\frac{P-W}{m_1} - \ddot{\xi} \right) \cdot \frac{1}{\Omega^2} \right]^2 dt \right\}^{1/2} \Rightarrow \min.$$

Для того, щоб виконувався критерій (15) необхідно задовольнити умову Ейлера-Пуассона, яка зводиться у даному випадку до рівняння:

$$\xi^{(IV)} = 0. \quad (16)$$

Будемо розшукувати розв'язок (16) у формі сплайна по t третього порядку:

$$\xi(t) = A_0 + A_1 \cdot t + A_2 \cdot t^2 + A_3 \cdot t^3, \quad (17)$$

Невизначені константи A_0, A_1, A_2, A_3 знайдемо із наступних початкових умов:

Четверта початкова умова повинна визначити фінальні (кінцеві) кінематичні параметри системи. Згідно першого закону механіки І. Ньютона маємо:

$$\ddot{\xi}|_{t=\tau_{II}} = 0; \Leftrightarrow \dot{\xi}|_{t=\tau_{II}} = V_C; \Leftrightarrow \xi|_{t=\tau_{II}} = \frac{F_2}{C}. \quad (19)$$

Використовуючи останню форму четвертої початкової (термінальної) умови (19) маємо:

$$A_0 = 0; \quad A_1 = 0; \quad A_2 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{F_1}{m_1} + \frac{F_2}{m} \right); \quad A_3 = \frac{\left\{ \frac{F_2}{C} - A_2 \cdot \tau_{II}^2 \right\}}{\tau_{II}^3}. \quad (20)$$

Остаточно, для закону руху системи підйому вантажу містобудівного крана, за якою виконується критерій якості руху (13), (15), маємо:

$$\xi(t) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{F_1}{m_1} + \frac{F_2}{m} \right) \cdot t^2 + \left\{ \frac{F_2}{C} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{F_1}{m_1} + \frac{F_2}{m} \right) \cdot \tau_{II}^2 \right\} \cdot \frac{t^3}{\tau_{II}^3}. \quad (21)$$

При цьому оптимальне значення $F_{np.}(t)$ має вигляд:

$$\{F_{np.}(t)\}_{opt.} = \frac{C}{2} \cdot \left(\frac{F_1}{m_1} + \frac{F_2}{m} \right) \cdot \left(t^2 - \frac{t^3}{\tau_{II}} \right) + F_2 \cdot \frac{t^3}{\tau_{II}^3}. \quad (22)$$

З виразу (22) чітко видно, що: $t = 0, \{F_{np.}(t)\}_{opt.} = 0$; при $t = \tau_{II}, \{F_{np.}(t)\}_{opt.} = F_2$. Ніяких різких змін амплітуди $F_{np.}(t)$ немає, як і коливань у канатній системі (рис.2).

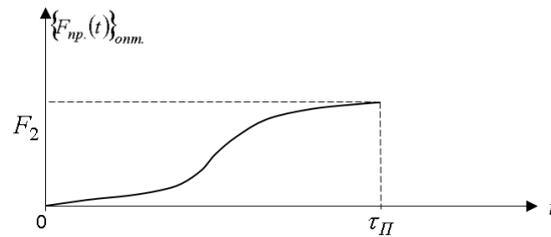


Рис.2. Залежність $\{F_{np.}(t)\}_{onn.}$

З другого рівняння системи (1) маємо:

$$\ddot{x} = \frac{C}{m} \cdot \xi(t) - \frac{F_2}{m}. \quad (23)$$

Використовуючи вираз для $\xi(t)$ (21) та початкові умови (6) для $x(t)$, можемо один раз по t проінтегрувати рівняння (23). Тоді одержимо закон для $\dot{x}(t)$ наступного виду:

$$\dot{x}(t) = \frac{C}{2m} \cdot \left(\frac{F_1}{m_1} + \frac{F_2}{m} \right) \cdot \left(\frac{t^3}{3} - \frac{t^4}{4\tau_{II}} \right) + \frac{F_2}{m} \cdot \frac{t^4}{4\tau_{II}^3} - \frac{F_2}{m} \cdot t. \quad (24)$$

Тоді для V_C , яка виражає значення усталеної швидкості підйому вантажу містобудівним краном у кінці періоду пуску (при $t = \tau_{II}$), маємо:

$$V_C = \frac{C}{2m} \cdot \left(\frac{F_1}{m_1} + \frac{F_2}{m} \right) \cdot \left(\frac{\tau_{II}^3}{12} \right) - \frac{F_2}{m} \cdot \frac{3}{4} \cdot \tau_{II}. \quad (25)$$

Зрозуміло, що для заданих значень всіх параметрів $(C, m, m_1, F_1, F_2, \tau_{II})$ величина V_C повинна задовольняти прийнятним для кранових систем обмеженням (допустимим значенням), котрі відповідають задіяним При підйомі вантажів режимам навантаження кранової системи.

5 ВИСНОВКИ

1. У роботі обґрунтована фізико-механічна модель та встановлені основні параметри і закони руху механізму підйому вантажу містобудівних кранів, за яких мінімізуються пружні сили, виникаючи у канатах, у режимах пуску таких систем.

2. У подальшому результати, отримані у даному дослідженні, можуть бути використані для уточнення та вдосконалення існуючих інженерних методів розрахунку механізмів підйому вантажів кранами як на стадіях їх проектування, так і у режимах реальної експлуатації.

6 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Автори не мають відповідних фінансових чи нефінансових інтересів, які слід розкрити.

Література

1. Ловейкін В. С. Оптимізація режимів руху машин і механізмів. *Машинознавство*. 1999. №7(25). С.24-31.
2. Горський Б. Є. Динамічне вдосконалення механічних систем. – К.: Віпол, 1995. 292 с.
3. Ловейкін В. С. Критерії оцінки режимів руху механізмів і машин. *Збірник наукових праць НАУУ*. К., 1998. Т.4. С. 8-12.
4. Човнюк Ю. В., Приймаченко О. В., Чередніченко П. П., Остапущенко О. П., Кравченко І. М. Аналіз пружних хвилеутворень у канатах вантажопідіймних кранів. *Сучасне будівництво і архітектура*. Зб. наук. праць. Одеса: ОДАБА, 2023. Вип. 4. С. 23-32.
5. Човнюк Ю. В., Кравчук В. Т., Чередніченко П. П., Остапущенко О. П., Кравченко І. М. Аналіз коливань, виникаючих у мостовому крані при його наїзді на кінцеві упори. *Містобудування і територіальне планування*. – К.: КНУБА, 2023. Вип. №83. С. 366-373.
6. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., Човнюк Ю. В., Кадикало І. О. Динаміка й оптимізація підйомно-транспортних машин. *Монографія* – К.: ЦП “Компрінт”, 2019. – 292 с.
7. Човнюк Ю. В., Чередніченко П. П., Кравчук В. Т., Остапущенко О. П., Кравченко І. М. Аналіз та оптимізація динамічних навантажень у пружних елементах/канатах будівельних кранів. *Просторовий розвиток*. – К.: КНУБА, 2023. Вип. №3. С. 90-107.
8. Ловейкін В. С., Човнюк Ю. В., Діктерук М. Г., Пастушенко С. І. *Моделювання динаміки механізмів вантажопідіймних машин*. – К. – Миколаїв: РВВ МДАУ, 2004. 286 с.
9. Човнюк Ю. В., Діктерук М. Г., Сівак І. М., Гуменюк Ю. О., Кравчук В. Т. *Моделювання, аналіз та оптимізація динаміки режимів руху вантажопідіймних машин*. *Монографія*. – К.: НУБіПУ, 2018. 865с.
10. Човнюк Ю. В., Сівак І. М. *Динаміка вантажопідіймних та будівельних машин*. . – К.: НУБіПУ, 2014. 470с.

References

1. Loveikin V. S. Optymizatsiia rezhymiv rukhu mashyn i mekhanizmv. *Mashynoznavstvo*. 1999. №7(25). S.24-31. {in Ukrainian}
2. Horskyi B. E., Loveikyn V. S. Kryteryi dynamycheskoho sovershenstvovaniya mekhanicheskykh system. *Teoriya mashyn metallurhycheskoho y hornoho oborudovaniya*. – Sverdlovsk: UPU, 1989. Выр.13. S. 98-102. {in Russian}
3. Horskyi B. E. Dynamycheskoe sovershenstvovanye mekhanicheskykh system. – K.: Vipol, 1995. 292 s. {in Russian}
4. Chovniuk Yu.V., Pryimachenko O.V., Cherednichenko P.P., Ostapushchenko O.P., Kravchenko I.M. Analiz pruzhnykh khvyleutvoren u kanatakh vantazhopidiomnykh kraniv. *Suchasne budivnytstvo i arkhitektura*. Zb. nauk. prats. Odesa: ODABA, 2023. Vyp. 4. S. 23-32. {in Ukrainian}
5. Chovniuk Yu.V., Kravchuk V.T., Cherednichenko P.P., Ostapushchenko O.P., Kravchenko I.M. Analiz kolyvan, vynykaiuchykh u mostovomu kranі pry yoho naizdi na kintsevi upory. *Mistobuduvannya i terytorialne planuvannya*. – K.: KNUBA, 2023. Vyp. №83. S. 366-373. {in Ukrainian}
6. Loveikin V. S., Romasevych Yu. O., Chovniuk Yu. V., Kadykalo I. O. *Dynamika y optymizatsiia pidiomno-transportnykh mashyn*. *Monohrafiia* – K.: TsP “Komprint”, 2019. – 292 s. {in Ukrainian}
7. Chovniuk Yu. V., Cherednichenko P. P., Kravchuk V. T., Ostapushchenko O. P., Kravchenko I. M. Analiz ta optymizatsiia dynamichnykh navantazhen u pruzhnykh elementakh/kanatakh budivelnykh kraniv. *Prostorovi rozvytok*. – K.: KNUBA, 2023. Vyp. №3. S. 90-107. {in Ukrainian}
8. Loveikin V. S., Chovniuk Yu. V., Dikteruk M. H., Pastushenko S. I. *Modeliuvannya dynamiky mekhanizmv vantazhopidiomnykh mashyn*. – K. – Mykolaiv: RVV MDAU, 2004. 286 s. {in Ukrainian}

9. Chovniuk Yu. V., Dikteruk M. H., Sivak I. M., Humeniuk Yu. O., Kravchuk V. T. Modeliuvannia, analiz ta optymizatsiia dynamiky rezhymiv rukhu vantazhopidiomnykh mashyn. Monohrafiia. – К.: NUBiPU, 2018. 865 s. {in Ukrainian}
10. Chovniuk Yu. V., Sivak I. M. Dynamika vantazhopidiomnykh ta budivelnykh mashyn. . – К.: NUBiPU, 2014. 470 s. {in Ukrainian}

Човнюк Юрій Васильович

Київський Національний університет будівництва та архітектури,
к.т.н., доцент
Повітрофлотський пр., 31, м. Київ, Україна, 03037
uchovnyuk@ukr.net
ORCID: 0000-0002-0608-0203

Приймаченко Олексій Віталійович

Київський Національний університет будівництва та архітектури,
к. т. н., доцент
Повітрофлотський пр., 31, м. Київ, Україна, 03037
prymachenko.ov@knuba.edu.ua
ORCID: 0000-0001-5125-8472

Чередніченко Петро Петрович

Київський Національний університет будівництва та архітектури,
доцент
Повітрофлотський пр., 31, м. Київ, Україна, 03037
petro_che@ukr.net
ORCID: 0000-0001-7161-661X

Турчанінова Людмила Іванівна

Київський Національний університет будівництва та архітектури,
к.ф.-м.н., доцент
Повітрофлотський пр., 31, м. Київ, Україна, 03037
turchaninova.li@knuba.edu.ua
ORCID:0000-0002-0224-9534

Шудра Наталія Сергіївна

Київський Національний університет будівництва та архітектури,
ст. викладач
Повітрофлотський пр., 31, м. Київ, Україна, 03037
Shudra_n@ukr.net
ORCID: 0000-0001-5416-7680

Для посилань:

Човнюк Ю. В., Приймаченко О. В., Чередніченко П. П., Турчанінова Л. І., Шудра Н. С. Фундаментальний аналіз та оптимізація (мінімізація) динамічних навантажень у пружних елементах механізмів підйому вантажу кранів. Частина I. Механіка та математичні методи, 2024. Т. VI. №. 1. С. 74–83.

For references:

Yu. Chovniuk, O. Priymachenko, P. Cherednichenko, L. Turchaninova, N. Shudra. (2024). Fundamental analysis and optimization (minimization) of dynamic loads in elastic elements of cranes load lifting mechanisms. Part I. Mechanics and Mathematical Methods. VI (1). 74–83.

УДК 621.01

ФУНДАМЕНТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ (МІНІМІЗАЦІЯ) ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ У ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТАХ МЕХАНІЗМІВ ПІДЙОМУ ВАНТАЖУ КРАНІВ Частина II

Човнюк Ю. В.¹, Чередніченко П. П.¹, Васильєва Г. Ю.¹, Турчанінова Л. І.¹,
Шудра Н. С.¹.

¹Київський Національний університет будівництва та архітектури

Анотація. Запропонована науково обґрунтована методика оптимізації режимів руху машин і механізмів (зокрема, містобудівельних кранів), яка заснована на мінімізації інтегральних функціоналів, котрі відображають небажані властивості механічних систем, а термінальні (початкові/кінцеві) умови руху механізму підйому вантажів кранами мають фізичний зміст і базуються на законах механіки Ньютона. Оптимізовані режими руху конкретних механічних систем з лінійною функцією положення елементів на прикладі механізмів вантажопідйомних містобудівельних кранів. Показано, що вплив режимів руху приводних механізмів на динамічні навантаження у пружних елементах механізму підйому вантажу містобудівельного крана (канатах) є суттєвим. Визначені параметри таких режимів функціонування/руху подібних систем, за яких мінімізовані саме динамічні напруження канатів на етапах пуску механізмів підйому вантажу кранів. Отримані у роботі результати можуть у подальшому слугувати для уточнення й вдосконалення існуючих інженерних методів розрахунку механізмів підйому вантажу містобудівельних кранів з метою мінімізації динамічних навантажень їх канатних систем на стадії пуску, а також задля запобігання виникнення можливих аварійних ситуацій. Подібний підхід можна реалізувати як на стадіях проектування вказаних механізмів, так і у режимах їх реальної експлуатації.

Ключові слова: фундаментальний аналіз, оптимізація, режими руху, динамічні навантаження, канатні системи, містобудівельні крани, вантажопідйомні механізми, стадія пуску, динамічні критерії.

FUNDAMENTAL ANALYSIS AND OPTIMIZATION (MINIMIZATION) OF DYNAMIC LOADS IN ELASTIC ELEMENTS OF CRANE LIFTING MECHANISMS. Part II

Yu. Chovniuk¹, P. Cherednichenko, H. Vasylieva¹, L. Turchaninova¹, N. Shudra¹

¹ Kyiv National University of Construction and Architecture

Abstract. A scientifically substantiated methodology of optimization of motion modes of machines and mechanisms (in particular, city-building cranes) based on minimization of integral functionals, which reflect undesirable properties of mechanical systems, and terminal (initial/final) conditions of motion of the mechanism of lifting cargoes by cranes have a physical meaning and are based on Newton's laws of mechanics, is proposed. The modes of motion of specific mechanical systems with a linear function of the position of elements are optimized on the example of mechanisms of load-lifting city-building cranes. It is shown that the influence of motion modes of drive mechanisms on dynamic loads in elastic elements of the mechanism of lifting mechanism of a city-building crane (ropes) is essential. The parameters of such modes of functioning/movement of such systems, at which exactly dynamic stresses of ropes at the stages of start-up of mechanisms of lifting mechanism of cranes are minimized, are determined. The results obtained in the work can further serve to clarify and improve the existing engineering methods of calculation of load lifting mechanisms of urban cranes in order to minimize the dynamic stresses of their rope systems at the



start-up stage, as well as to prevent the occurrence of possible emergency situations. Such an approach can be realized both at the stages of design of the mentioned mechanisms and in the modes of proper operation.

Keywords: fundamental analysis, optimization, motion modes, dynamic loads, wire rope systems, urban cranes, hoisting mechanisms, start-up stage, dynamic criteria.

1 ВСТУП

Характер руху основних ланок механізму підйому вантажу містобудівного крана суттєво впливає на якість виконання ним різноманітних технологічних операцій (процесів), на продуктивність, надійність, довговічність його функціонування.

Зокрема, режим руху тієї чи іншої ланки вказаного механізму визначається законом зміни у часі або положення кінематичних характеристик (переміщень, швидкості і так далі) й часом власне самого руху. Для певної конструкції механізму підйому вантажу крана закон руху окремої ланки (наприклад, приводної чи канатної системи) визначає й закони руху інших ланок.

У практиці проектування подібних механізмів використовуються різні типові режими руху: зі сталою швидкістю; зі сталим пришвидшенням; зі змінними пришвидшеннями за лінійними, косинусоїдальним, синусоїдальним, поліноміальним, експоненціальним та іншими законами. Кожний з цих режимів руху оптимізує ті чи інші властивості механізмів з лінійною функцією положення провідної ланки відносно веденої. Окремі типові режими руху оптимізують тільки якусь одну властивість таких механізмів. Але у багатьох випадках потрібно обирати режими руху, які оптимізують комплекс властивостей механізму підйому вантажу містобудівного крану.

Зазвичай для вибору таких режимів руху вантажопідйомних механізмів потрібні динамічні критерії їхньої оцінки. Існуючі критерії оцінки вказаних механізмів можна умовно розділити на два класи: 1) позиційні (максимальні значення кінематичних характеристик ланок, динамічних навантажень, амплітуд і частот коливань, коефіцієнтів динамічності тощо); 2) інтегральні (середньоквадратичні за час руху значення кінематичних характеристик ланок і динамічних навантажень, енергетичні витрати і тому подібне). Аналіз цих критеріїв дозволяє стверджувати, що для оцінки режимів руху вантажопідйомних механізмів містобудівних кранів необхідно використовувати саме інтегральні критерії, оскільки вони оцінюють рух протягом усього циклу. Існуючі інтегральні критерії оцінки зазначених вище механізмів (функціональних, наприклад, у режимах пуску) не повною мірою відображають їхні динамічні властивості та характеристики руху, тому й виникає потреба у розробці нових динамічних критеріїв.

Оскільки режими руху – це функціональні залежності переміщень, швидкостей, пришвидшень тощо ланок механізму підйому вантажу крана від просторового і часового аргументів протягом усього циклу руху, тоді критерій оптимальності повинен мати вигляд інтегрального функціонала. Крім того, процедура порівняння допустимих режимів руху можлива тільки у тому випадку, коли критерій виражається скалярною величиною і для кожного режиму набуває конкретного числа. Залежності режимів руху механізмів можуть набувати як додатних, так і від'ємних значень, тому у виразі підінтегральних функцій вони мають входити у квадратичному вигляді. Підінтегральні функції критеріїв повинні виключати також і сили опору, які діють на елементи механізму, оскільки вони залежать від режимів руху.

Оцінка режимів руху може бути здійснена шляхом використання критеріїв з підінтегральними функціями у вигляді «енергії» пришвидшень вищих порядків (третього, четвертого і так далі). Саме такі критерії використовуються при виборі режимів руху механізмів і машин з пружними елементами. Цей підхід дає можливість досягнути неперервності функцій швидкості і пришвидшень різних порядків ланок системи, що призводить до значного зменшення їх коливань.

Повний цикл руху машини/механізму підйому вантажу містобудівного крана можна розділити на три основні стадії: 1) стадія пуску (розбігу); 2) стадія сталого руху; 3) стадія зупинки (вигибу). Кожна з цих стадій характеризується тривалістю у часі і

законами руху ланок. Зазвичай вважають, що тривалості стадій задані, а потрібно визначити на них режими руху, які мінімізують певні критерії якості вантажопідйомного механізму крана.

Стадія пуску характеризується зростанням швидкості ланки, наприклад, провідної, від нульового значення до певної величини. Тут можна використати різні режими руху, який мінімізують інерційні навантаження, потужність приводу, навантаження коливного характеру або комплекс цих характеристик. Крім того, на стадії пуску можна знайти режими руху, які при заданих обмеженнях на вищенаведені характеристики забезпечують мінімальну тривалість пуску.

Стадія усталеного руху характеризується процесом, під час якого енергетичні витрати приводу підтримуються на сталому рівні. На цій стадії також можна розглянути дві задачі: 1) при заданій тривалості руху (продуктивності) обрати такий режим, який мінімізує енергетичні витрати; 2) при заданих обмеженнях на енергетичні витрати обрати режим руху, який забезпечує мінімальну тривалість усталеного руху. Тому на цій стадії критерієм оцінки режиму руху має бути добуток енергії на час руху.

Стадія зупинки характеризується зменшенням швидкості руху ланок від певних значень до нульового. Таке зменшення швидкостей досягається шляхом поглинання кінетичної енергії системи спеціально створеними пристроями, наприклад, гальмівними механізмами. У процесі гальмування можуть виникати значні динамічні навантаження, у тому числі й навантаження коливного характеру, які діють на ланки вантажопідйомного механізму крана. Останні навантаження значною мірою залежать від інтенсивності зміни динамічних навантажень, які визначаються швидкістю зміни пришвидшень. Тому на цій стадії можуть бути використані такі ж критерії, як і на стадії пуску.

Для створення оптимальних режимів пуску механізму підйому вантажу містобудівних кранів, які мінімізують коливання та динамічні навантаження у пружних елементах (канатах), необхідно встановити спеціальні критерії, на основі котрих можна визначити основні параметри (кінематично-силові) вказаних режимів. Саме вирішенню вище зазначених проблем та розв'язку відповідних задач присвячене дане дослідження.

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У практиці проектування механізмів підйому вантажу містобудівними кранами використовуються різноманітні типові режими руху, розглянуті у [1]. Автори [2-6] розробили основні критерії оцінки машин і механізмів, які були узагальнені та вдосконалені у роботі [7]. Проте використання останніх у практичних задачах, на погляд авторів даного дослідження, за необґрунтованих термінальних (початкових/кінцевих) умов призводить до непослідовних результатів, у яких відсутні причинно-наслідкові зв'язки (наприклад, існує рух у системі, а сили, які його викликали – відсутні і тому подібне). Саме для ліквідації подібних недоречностей і виконане дане дослідження.

3 ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета роботи полягає у обґрунтуванні критеріїв та режимів руху вантажопідйомних механізмів містобудівних кранів, за яких мінімізовані динамічні навантаження у канатних системах при функціонуванні вказаних механічних систем у режимах пуску. При цьому обґрунтовані термінальні умови для реалізації вказаних вище рухів (режимів функціонування), які впливають з фізичного обґрунтованих причинно-наслідкових зв'язків, що призводять до виникнення таких рухів.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Визначення оптимальних режимів пуску механізму підйому вантажу містобудівного крана за різними критеріями.

4.1.1 *Силовий динамічний режим.* За критерій оптимізації використаємо функціонал, у якого підінтегральна функція є квадратом сили інерції, яка діє на вантаж:

$$I_1 = \int_0^{\tau_{II}} (m \cdot \ddot{x})^2 dt \Rightarrow \min, \quad (1)$$

де m – маса вантажу, \ddot{x} – пришвидшення вантажу, τ_{II} – тривалість процесу пуску механізму підйому крана. Необхідною умовою реалізації (1) є рівняння Ейлера-Пуассона:

$$x^{(IV)} = 0. \quad (2)$$

Розв'язок (2) шукаємо у формі сплайна по t третього порядку:

$$x(t) = A_0 + A_1 \cdot t + A_2 \cdot t^2 + A_3 \cdot t^3, \quad (3)$$

де: константи A_0, A_1, A_2, A_3 визначаються з наступних термінальних умов (які, до речі, є фізично обґрунтованими, оскільки у них чітко прослідковуються причинно-наслідкові зв'язки, що призводять до виникнення такого руху):

$$x|_{t=0} = 0; \quad \dot{x}|_{t=0} = 0; \quad \ddot{x}|_{t=0} = \frac{F(0)}{m}; \quad \dot{x}|_{t=\tau_{II}} = V_C. \quad (4)$$

де: $F(0)$ – результуюча сила, що діє на вантаж маси m у початковий момент часу ($t = 0$), V_C – стала швидкість підйому вантажу. Для $x(t)$ отримаємо з (3), (4):

$$x(t) = \frac{F(0)}{2m} \cdot t^2 + \left\{ V_C - \frac{F(0) \cdot \tau_{II}}{m} \right\} \cdot \frac{t^3}{(3\tau_{II}^2)}. \quad (5)$$

для пришвидшення $a(t)$ у процесі пуску за законом руху вантажу (5) маємо:

$$a(t) = \frac{F(0)}{m} + \left\{ V_C - \frac{F(0) \cdot \tau_{II}}{m} \right\} \cdot \frac{2t}{\tau_{II}^2}. \quad (6)$$

4.1.2 *Ривковий режим (за пришвидшенням другого порядку).*

Оптимальний ривковий режим пуску механізму підйому крана отримаємо мінімізацією функціонала з підінтегральною функцією, яка є квадратом градієнта сили енергії по часу t :

$$I_2 = \int_0^{\tau_{II}} (m \cdot \dot{\ddot{x}})^2 dt \Rightarrow \min, \quad (7)$$

Термінальні умови для цього виду руху вантажу набувають наступного вигляду:

$$x|_{t=0} = 0, \quad \dot{x}|_{t=0} = 0, \quad \ddot{x}|_{t=0} = \frac{F(0)}{m}, \quad x|_{t=\tau_{II}} = x_{II}, \quad \dot{x}|_{t=\tau_{II}} = V_C, \quad \ddot{x}|_{t=\tau_{II}} = 0. \quad (8)$$

де: x_{II} – скінчене значення переміщення вантажу у процесі пуску механізму при завершенні цього етапу й набуття вантажем усталеної швидкості руху V_C .

Необхідною умовою реалізації критерію (7) є рівняння Ейлера-Пуассона:

$$x^{(VI)} = 0. \quad (9)$$

розв'язок якого розшукуємо у вигляді сплайна по t п'ятого порядку:

$$x(t) = B_0 + B_1 \cdot t + B_2 \cdot t^2 + B_3 \cdot t^3 + B_4 \cdot t^4 + B_5 \cdot t^5, \quad (10)$$

де: константи $B_0, B_1, B_2, B_3, B_4, B_5$ визначаємо з термінальних умов (8). Остаточного матимемо:

$$B_0 = B_1 = 0; B_2 = \frac{F(0)}{2m}; \quad (11)$$

а константи B_3, B_4, B_5 можна знайти з наступної системи лінійних рівнянь за правилом Крамера:

$$\begin{cases} B_3 \cdot \tau_{II}^3 + B_4 \cdot \tau_{II}^4 + B_5 \cdot \tau_{II}^5 = x_{II} - \frac{F(0)}{2m} \cdot \tau_{II}^2; \\ 3B_3 \cdot \tau_{II}^2 + 4B_4 \cdot \tau_{II}^3 + 5B_5 \cdot \tau_{II}^4 = V_C - \frac{F(0)}{2m} \cdot \tau_{II}; \\ 3B_3 \cdot \tau_{II} + 6B_4 \cdot \tau_{II}^2 + 10B_5 \cdot \tau_{II}^3 = -\frac{F(0)}{2m}. \end{cases} \quad (12)$$

Тому остаточний вигляд $x(t)$ набуває таким:

$$x(t) = \frac{F(0)}{2m} \cdot t^2 + B_3 \cdot t^3 + B_4 \cdot t^4 + B_5 \cdot t^5, \quad (13)$$

Для пришвидшення $a(t)$ у процесі пуску за законом руху вантажу (13) маємо:

$$a(t) = \frac{F(0)}{m} + 6 \cdot B_3 \cdot t + 12 \cdot B_4 \cdot t^2 + 20 \cdot B_5 \cdot t^3. \quad (14)$$

4.1.3 *Режим пуску (за пришвидшенням третього порядку).* Синтез оптимального за пришвидшеннями третього порядку режиму пуску при підйомі вантажу здійснюється при мінімізації критерію з підінтегральною функцією, яка є квадратом другої похідної по часу від сили енергії, діючої на вантаж:

$$I_3 = \int_0^{\tau_{II}} (m \cdot x^{(IV)})^2 dt \Rightarrow \min, \quad (15)$$

Необхідною умовою реалізації (15) є наступне рівняння Ейлера-Пуассона:

$$x^{(VIII)} = 0. \quad (16)$$

Розв'язок рівняння (16) розшукуємо у вигляді сплайна по t сьомого порядку:

$$x(t) = C_0 + C_1 \cdot t + C_2 \cdot t^2 + C_3 \cdot t^3 + C_4 \cdot t^4 + C_5 \cdot t^5 + C_6 \cdot t^6 + C_7 \cdot t^7, \quad (17)$$

Константи $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7$ розшукуємо, використовуючи наступні термінальні умови:

$$\begin{cases} x|_{t=0} = 0; & \dot{x}|_{t=0} = 0; & \ddot{x}|_{t=0} = \frac{F(0)}{m}; & \ddot{\ddot{x}}|_{t=0} = \frac{\dot{F}(0)}{m}; \\ x|_{t=\tau_{II}} = x_{II}; & \dot{x}|_{t=\tau_{II}} = V_C; & \ddot{x}|_{t=\tau_{II}} = 0; & \ddot{\ddot{x}}|_{t=\tau_{II}} = 0. \end{cases} \quad (18)$$

У результаті маємо:

$$C_0 = 0; \quad C_1 = 0; \quad C_2 = \frac{F(0)}{2m}; \quad C_3 = \frac{\dot{F}(0)}{6m}; \quad (19)$$

а константи C_4, C_5, C_6, C_7 можна знайти з наступної системи лінійних рівнянь за правилом Крамера:

$$\begin{cases} C_4 \cdot \tau_{II}^4 + C_5 \cdot \tau_{II}^5 + C_6 \cdot \tau_{II}^6 + C_7 \cdot \tau_{II}^7 = -\frac{F(0)}{2m} \cdot \tau_{II}^2 - \frac{\dot{F}(0)}{6m} \cdot \tau_{II}^3 + x_{II}; \\ 4C_4 \cdot \tau_{II}^3 + 5C_5 \cdot \tau_{II}^4 + 6C_6 \cdot \tau_{II}^5 + 7C_7 \cdot \tau_{II}^6 = -\frac{F(0)}{m} \cdot \tau_{II} - \frac{\dot{F}(0)}{2m} \cdot \tau_{II}^2 + V_C; \\ 12C_4 \cdot \tau_{II}^2 + 20C_5 \cdot \tau_{II}^3 + 30C_6 \cdot \tau_{II}^4 + 42C_7 \cdot \tau_{II}^5 = -\frac{F(0)}{m} - \frac{\dot{F}(0)}{m} \cdot \tau_{II}; \\ 24C_4 \cdot \tau_{II} + 60C_5 \cdot \tau_{II}^2 + 120C_6 \cdot \tau_{II}^3 + 210C_7 \cdot \tau_{II}^4 = -\frac{\dot{F}(0)}{m}. \end{cases} \quad (20)$$

Остаточно для $x(t)$ у цьому випадку маємо:

$$x(t) = \frac{F(0)}{2m} \cdot t^2 + \frac{\dot{F}(0)}{6m} \cdot t^3 + C_4 \cdot t^4 + C_5 \cdot t^5 + C_6 \cdot t^6 + C_7 \cdot t^7. \quad (21)$$

Для пришвидшення $a(t)$ у процесі пуску за законом руху вантажу (21) маємо:

$$a(t) = \frac{F(0)}{m} + \frac{\dot{F}(0)}{m} \cdot t + 12 \cdot C_4 \cdot t^2 + 20 \cdot C_5 \cdot t^3 + 30 \cdot C_6 \cdot t^4 + 42 \cdot C_7 \cdot t^5. \quad (22)$$

Слід зазначити, що динамічний/силовий режим пуску мінімізує потужність приводу, однак він має на початку руху певне значення прискорення, відмінне від нуля. Крім того, за умови:

$$V_C - \frac{F(0) \cdot \tau_{II}}{m} > 0, \quad (23)$$

його (пришвидження) миттєве значення починає зростати на початку руху, що не дозволяє використати такий режим, як оптимальний динамічний/силовий у механізмах, яким потрібен доволі плавний пуск. Ривковий режим руху забезпечує плавну зміну пришвидження вантажу на всій ділянці пуску, що й дає можливість використати його припуску без значних коливань вантажу. Однак при оптимальному ривковому режимі на початку пуску миттєво наростає значення функції ривка вантажу, що, у свою чергу, не дає можливості повністю позбутись небажаних коливань вантажу на канатах механізму підйому.

Режим пуску за пришвидшеннями третього порядку забезпечує плавну зміну пришвидшення і ривка вантажу на всій ділянці руху, що й призводить до мінімізації коливань вантажу на канатах механізму підйому.

4.2 Аналіз впливів режимів пуску на динамічні навантаження, які виникають у пружних елементах (канатах) механізму підйому.

Як і у першій частині дослідження, використаємо двомасову динамічну модель механізму підйому крана, рівняння руху якого мають вигляд:

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{x}_1 = F_1(t) - c \cdot (x_1 - x); \\ m \cdot \ddot{x} = C \cdot (x_1 - x) - F_2(t). \end{cases} \quad (24)$$

де m , m_1 – зведені до підйомного каната маси відповідно вантажу і приводного механізму з барабаном; x , x_1 – узагальнені координати відповідно мас m та m_1 ; $F_1(t)$ та $F_2(t)$ – рушійна сила приводу і вага вантажу, зведені до вантажного каната; C – жорсткість каната.

Після введення у систему (24) нової змінної:

$$\xi = (x_1 - x), \quad (25)$$

система (24) набуває вигляду:

$$\ddot{\xi} + k^2 \cdot \xi = \frac{F_1(t)}{m_1} + \frac{F_2(t)}{m}, \quad k^2 = C \cdot \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right). \quad (26)$$

У подальшому приймаємо:

$$F_2 = const, \quad \frac{F_1(t)}{m_1} + \frac{F_2}{m} = a(t), \quad (27)$$

де $a(t)$ – функція пришвидшення цього або іншого режиму руху приводного механізму, яка залежить від часу t й визначена вище у п.1 дослідження.

Тому рівняння (27) можна подати у наступному вигляді:

$$\ddot{\xi} + k^2 \cdot \xi = a(t). \quad (28)$$

Задля мінімізації динамічних навантажень у канаті для будь-яких режимів руху механізму підйому вантажу необхідно задовольнити наступний критерій якості рухів:

$$\tilde{I} = \int_0^{\tau_H} \left\{ \frac{C}{k^2} \cdot a(t) - \frac{C \cdot \ddot{\xi}}{k^2} \right\}^2 dt \Rightarrow min. \quad (29)$$

Необхідною умовною реалізації (29) є рівняння Ейлера-Пуассона наступного виду:

$$\xi^{(IV)} = \ddot{a}(t). \quad (30)$$

Для силового/динамічного режиму руху (30) набуває наступного виду:

$$\xi^{(IV)} = 0. \quad (31)$$

Для ривкового режиму руху (30) набуває виду:

$$\xi^{(IV)} = 24B_4 + 120B_5 \cdot t. \quad (32)$$

Для режиму пуску за пришвидшеннями третього порядку маємо:

$$\xi^{(IV)} = 24 \cdot C_4 + 120 \cdot C_5 \cdot t + 360 \cdot C_6 \cdot t^2 + 480 \cdot C_7 \cdot t^3. \quad (33)$$

Розв'язок рівнянь (31), (32), (33), шукаємо за наступних термінальних умов:

$$\xi|_{t=0} = 0; \quad \dot{\xi}|_{t=0} = 0; \quad \ddot{\xi}|_{t=0} = a(0); \quad \xi|_{t=\tau_{II}} = \frac{F_2}{C} = \frac{mg}{C}. \quad (34)$$

Для силового/динамічного режиму руху розв'язок (31) за умов (34) має вид:

$$\xi(t) = \frac{a(0)}{2} \cdot t^2 + \frac{1}{\tau_{II}^3} \cdot \left\{ \frac{mg}{C} - \frac{a(0)}{2} \cdot \tau_{II}^2 \right\} \cdot t^3. \quad (35)$$

Для ривкового режиму руху розв'язок (32) має вид:

$$\xi(t) = \frac{a(0)}{2} \cdot t^2 + \tilde{B}_3 \cdot t^3 + B_4 \cdot t^4 + B_5 \cdot t^5, \quad (36)$$

де:

$$\tilde{B}_3 = \left\{ \frac{mg}{C} - \frac{a(0)}{2} \cdot \tau_{II}^2 - B_4 \cdot \tau_{II}^4 - B_5 \cdot \tau_{II}^5 \right\} \cdot \tau_{II}^{-3}. \quad (37)$$

Для режиму пуску з пришвидшенням третього порядку розв'язок (33) має вид:

$$\xi(t) = \frac{a(0)}{2} \cdot t^2 + \tilde{C}_3 \cdot t^3 + C_4 \cdot t^4 + C_5 \cdot t^5 + C_6 \cdot t^6 + C_7 \cdot t^7, \quad (38)$$

де:

$$\tilde{C}_3 = \left\{ \frac{mg}{C} - \frac{a(0)}{2} \cdot \tau_{II}^2 - C_4 \cdot \tau_{II}^4 - C_5 \cdot \tau_{II}^5 - C_6 \cdot \tau_{II}^6 - C_7 \cdot \tau_{II}^7 \right\} \cdot \tau_{II}^{-3}. \quad (39)$$

Величина динамічного навантаження на канатну систему механізму підйому вантажу містобудівного крана для всіх випадків (35), (36), (38) має плавний характер:

$$P_{\text{навантаження}}(t) = C \cdot \xi(t), \quad (40)$$

а коливання вантажу на канаті відсутні.

5 ВИСНОВКИ

1. Обґрунтована фізико-механічна модель руху вантажу на канаті при його підйомі (стадія пуску) механізмом підйому вантажу містобудівного крану. Обчислені аналітичним шляхом основні кінематично-силові параметри рухів, за яких мінімізовані динамічні навантаження на канатну систему, а коливання відсутні.

2. Отримані у даному дослідженні результати можуть у подальшому слугувати для уточнення й вдосконалення існуючих інженерних методів розрахунку механізмів підйому вантажу містобудівних кранів (як і кранів інших конструкцій) на стадіях їх проектування та у режимах реальної експлуатації. 3. Дотримання визначених у даній роботі режимів пуску вантажопідйомних механізмів кранів дозволяє суттєво продовжити термін надійної експлуатації їх конструкцій у безаварійному режимі.

6 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Автори не мають відповідних фінансових чи нефінансових інтересів, які слід розкривати.

Література

1. Левитский Н. И. Теория механизмов и машин. – М.: Наука, 1990. 592 с.
2. Горский Б. Е., Ловейкин В. С. Критерии динамического совершенствования механических систем. Теория машин металлургического и горного оборудования. – Свердловск: УПИ, 1989. Вып.13. С. 98-102.
3. Горский Б. Е. Динамическое совершенствование механических систем. – К.: Віпол, 1995. 292 с.
4. Хитрик В. Э. Методы динамической оптимизации механизмов машин-автоматов. – Л.: Изд-во Ленинского гр. ун-та, 1974. 116 с.
5. Ловейкін В. С. Критерії оцінки режимів руху механізмів і машин. Збірник наукових праць НАУ. К., 1998. Т.4. С. 8-12.
6. Кильчевский Н. А. Курс теоретической механики. – М.: Наука, 1977. 544 с.
7. Ловейкін В. С. Оптимізація режимів руху машин і механізмів. Машинознавство. 1999. №7(25). С.24-31.

References

1. Levytskyi N. Y. Teoryia mekhanyzmov y mashyn. – M.: Nauka, 1990. 592 s. {in Russian}.
2. Horskyi B. E., Loveikyn V. S. Kryteryu dynamycheskoho sovershenstvovaniya mekhanycheskykh system. Teoryia mashyn metallurhycheskoho y hornoho oborudovaniya. – Sverdlovsk: UPU, 1989. Выр.13. S. 98-102. {in Russian}
3. Horskyi B. E. Dynamycheskoe sovershenstvovanye mekhanycheskykh system. – K.: Vipol, 1995. 292 s. {in Russian}
4. Khytryk V. Э. Metody dynamycheskoi optymyzatsyy mekhanyzmov mashyn-avtomatov. – L.: Yzd-vo Lenynskoho hr. un-ta, 1974. 116 s. {in Russian}
5. Loveikin V. S. Kryterii otsinky rezhymiv rukhu mekhanizmiv i mashyn. Zbirnyk naukovykh prats NAU. K., 1998. T.4. S. 8-12. {in Ukrainian}
6. Kylchevskyi N. A. Kurs teoretycheskoi mekhanyky. – M.: Nauka, 1977. 544 s. {in Russian}.
7. Loveikin V. S. Optymizatsiia rezhymiv rukhu mashyn i mekhanizmiv. Mashynoznavstvo. 1999. №7(25). S.24-31. {in Ukrainian}

Човнюк Юрій Васильович

Київський Національний університет будівництва та архітектури,
к.т.н., доцент
Повітрофлотський пр., 31, м. Київ, Україна, 03037
uchovnyuk@ukr.net
ORCID: 0000-0002-0608-0203,

Чередніченко Петро Петрович

Київський Національний університет будівництва та архітектури,
доцент
Повітрофлотський пр., 31, м. Київ, Україна, 03037
petro_che@ukr.net
ORCID: 0000-0001-7161-661X

Васильєва Ганна Юрїївна,

Київський Національний університет будівництва та архітектури,
к.т.н., доцент
Повітрофлотський пр., 31, м. Київ, Україна, 03037
anvas677@gmail.com,
ORCID: 0000-0003-0557-6925



Турчанінова Людмила Іванівна

Київський Національний університет будівництва та архітектури,
к.ф.-м.н., доцент
Повітрофлотський пр., 31, м. Київ, Україна, 03037
turchaninova.li@knuba.edu.ua,
ORCID:0000-0002-0224-9534

Шудра Наталія Сергіївна

Київський Національний університет будівництва та архітектури,
ст. викладач
Повітрофлотський пр., 31, м. Київ, Україна, 03037
Shudra_n@ukr.net
ORCID: 0000-0001-5416-7680

Для посилань:

Човнюк Ю. В., Чередніченко П. П., Васильєва Г. Ю., Турчанінова Л. І., Шудра Н. С. Фундаментальний аналіз та оптимізація (мінімізація) динамічних навантажень у пружних елементах механізмів підйому вантажу кранів. Частина II. Механіка та математичні методи, 2024.Т. VI. №. 1. С. 84–94.

For references:

Yu. Chovniuk, P. Cherednichenko, H. Vasyliieva, L. Turchaninova, N. Shudra. (2024). Fundamental analysis and optimization (minimization) of dynamic loads in elastic elements of crane lifting mechanisms. Part II. Mechanics and Mathematical Methods. VI (1). 84–94.

УДК 004.738

ЗАСОБИ ТА ІНСТРУМЕНТИ ДЛЯ РОЗРОБКИ ВЕБ-ДОДАТКУ З ТЕСТУВАННЯ РІВНЯ ЗНАНЬ СТУДЕНТІВ

Ічанська Н. В.¹

¹*Національний університет «Полтавська політехніка ім. Юрія Кондратюка»*

Анотація. Роботу присвячено дослідженню сучасних технологій створення веб-додатків та їх використанню при тестуванні рівня знань. Вивчено сучасні актуальні технології, що дозволяють створювати веб-додатки та проведено порівняльний аналіз найпопулярніших фреймворків для веб-розробок.

Предмет дослідження роботи – це існуючі сучасні фреймворки та засоби реалізації створення веб-додатків. У даній науковій роботі зосереджено увагу на вивченні актуальних технологій, що стосуються створення веб-додатків та їх використання у тестуванні рівня знань. Проведено ретельний аналіз сучасних методик, які сприяють ефективному процесу розробки веб-орієнтованих застосунків. Досліджено та детально описано ключові технології, що лежать в основі розробки веб-додатків, включаючи висвітлення порівняльного аналізу найбільш популярних фреймворків для веб-розробок.

Розглянуто засоби супроводу розробки та створено навчальний веб-додаток для проведення тестування онлайн. Особливу увагу приділено інструментам, які сприяють ефективній розробці та супроводженню проєктів, зокрема розглянуто засоби супроводу розробки та їх роль у виготовленні веб-додатків. Авторами розроблено навчальний веб-додаток для проведення онлайн-тестувань, використовуючи один із найбільш популярних JavaScript фреймворків – Angular.

Мета роботи – вибір сучасного фреймворку для розробки навчального веб-додатку. Головна мета цієї роботи полягала у виборі сучасного фреймворку для створення освітнього веб-додатку, а також у розробці повноцінного веб-додатку, готового до використання. **Результати** – створення веб-додатку, повністю готового до використання. Цей веб-додаток є результатом системного вивчення сучасних фреймворків та інструментів для створення веб-додатків і може використовуватися в освітній сфері для проведення тестів та оцінювання рівня знань, а також у інших галузях, де потрібне онлайн-тестування та збір інформації про знання користувачів.

Ключові слова: фреймворк, веб-додаток, мова програмування, JavaScript, Angular, React, Vue.

TOOLS AND INSTRUMENTS FOR DEVELOPING A WEB APPLICATION WITH STUDENT KNOWLEDGE LEVEL TESTING

N. Ichanska¹

¹*Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic National University*

Abstract. This work is dedicated to the exploration of modern web application development technologies and their use in assessing knowledge levels. Current and relevant technologies facilitating web application creation were studied, and a comparative analysis of the most popular frameworks for web development was conducted.

The research subject of this scientific work revolves around existing contemporary frameworks and tools utilized in developing web applications. The study concentrates on learning about current technologies associated with web application development and their utilization in assessing knowledge levels. A thorough analysis of contemporary methodologies facilitating an effective web-oriented

application development process was carried out. The key technologies forming the foundation of web application development were scrutinized and elaborately described, including a comparative analysis of the most widely used frameworks for web development.

Tools aiding in development support were examined, and an educational web application for conducting online testing was created. Particular emphasis was given to instruments fostering effective project development and support. The work delved into development support tools and their role in creating web applications. The authors developed an educational web application for online testing, utilizing one of the most popular JavaScript frameworks - Angular.

The objective of this work was to select a modern framework for educational web application development. The primary goal was to choose a contemporary framework for crafting an educational web application and develop a fully functional web application ready for use.

The outcomes included the creation of a fully functional web application ready for deployment. This web application resulted from a comprehensive study of contemporary frameworks and tools for web application creation. It can be utilized in the educational sphere for conducting tests and assessing knowledge levels, as well as in other fields requiring online testing and the collection of user knowledge information.

Keywords: framework, web application, programming language, JavaScript, Angular, React, Vue.

1 ВСТУП

Нещодавно Інтернет використовували обмежено для базових потреб, таких як пошук інформації або електронна пошта. Тепер Інтернет став таким же звичним, як телефон. Незліченна безліч нових технологій, викликаних бурхливим зростанням інформатизації суспільства, робить наше життя неможливим без швидкого доступу до інформації. У наш час дуже легко отримати інформацію, одним із способів швидкого доступу до неї є сайт. Користувачеві приємно відвідувати саме ті веб-сторінки, які мають стильне оформлення, що мають зручний дизайн, яскраву графіку, гнучку анімацію та швидко завантажуються і правильно відображаються у вікні веб-браузера. Але може виникнути й інша проблема - сайт може виявитися не цікавим користувачеві і та інформація, яку він несе, виявиться не затребуваною. Саме тому важливо, щоб сайт відповідав всім вимогам користувача.

Темою наукового дослідження обрано систему, що дозволяє провести онлайн тестування максимально просто: ви створюєте тест, поширюєте його і отримуєте вже оброблені результати. Більше не потрібно створювати документ, друкувати його, передавати людині для його проходження та обробляти отриману інформацію. Це дає можливість користувачеві пройти опитування в будь-якій точці світу маючи тільки ноутбук або смартфон та підключення до мережі інтернет.

Дистанційне дослідження збільшують рівень залученості учасників за допомогою візуального та текстового сприйняття. Онлайн тестування залишають можливість вибору часу і місця участі та можуть бути завершені в будь-який момент.

Одним з ключових моментів в розвитку всесвітньої павутини є веб-розробка та сам процес створення веб-додатку. Цей процес містить в собі розробку веб-додатків, веб-дизайн, програмування як на стороні клієнта так і на стороні серверу.

На сьогоднішній день ефективною та найбільш вживаною мовою програмування для розробки зовнішньої частини додатку є JavaScript. Також дуже популярним та якісним є використання платформи фреймворків, а саме програмного забезпечення, котре полегшує розробку веб-додатку. Використання фреймворків є широко вживаним та актуальним.

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Вплив глобальної комп'ютерної мережі Інтернет на сучасний світ унікальний і не має історичних аналогів. Сучасність стала початком нової епохи, де електронний вплив проникає у всі сфери людського життя. Більшість людей сьогодні користуються Інтернетом як головним джерелом інформації, оскільки він є найбільш доступним.

Технологія веб-розробки радикально змінила спосіб взаємодії з інформацією та комп'ютером загалом. З'явилося розуміння, що традиційні показники розвитку комп'ютерів - продуктивність, пропускну здатність, обсяг пам'яті - не враховували головного аспекту: зручного інтерфейсу для спілкування між системою та людиною.

Застарілий механізм взаємодії з інформаційними системами уповільнював впровадження нових технологій і обмежував їх потенціал. Тільки тоді, коли інтерфейс між людиною і комп'ютером став більш природним для сприйняття звичайною людиною, зросло зацікавлення до можливостей обчислювальної техніки.

Дослідники з усього світу виявляють інтерес до віртуальних спільнот, що обумовлено зростанням їх кількості, постійними технологічними змінами та впровадженням новітніх технологій для підтримки їхньої діяльності.

Сучасні наукові дослідження широко орієнтовані на вивчення віртуальних спільнот та їх впливу на суспільство, що відображено у працях вчених різних напрямків, а саме В.Ю. Бикова, М.І. Жалдака, Н.Т. Задорожної, В.М. Кухаренко, І.Д. Малицької, Н.В. Морзе (Україна), С. Віркуса (Великобританія), Д. Боудена (США) [1]. Дослідження та публікації, які охоплюють нові підходи, технології та найкращі практики в розробці веб-додатків, є актуальними та сприяють подальшому розвитку цієї сфери.

3 ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Зараз думки розробників веб-додатків поділяються на тих хто вважає застосування фреймворків ефективним, і тих, хто підтримує ідею відмови від фреймворків. Ідея відмови від фреймворків стає все більш популярною. Але це також не зовсім правильно, на думку авторів відповідь на питання: застосовувати фреймворк чи ні залежить від конкретної ситуації.

Нехай розробник має достатній досвід і навички для того, щоб дійсно відмовитися від фреймворків. Та чи достатньо досвіду та навиків в інших членів вашої команди чи в тих осіб, які працюватимуть з проектом в подальшому? Відповіді на ці питання немає. Зауважимо, що прийняті при розробці рішення можуть бути не завжди актуальними. Подібні проблеми, зазвичай, призводять до того що починаючи роботу без використання фреймворку, команда все ж таки приходять до створення власного фреймворку, який їй необхідно буде самостійно підтримувати. Це підвищує вимоги до кваліфікації членів команди. Задача підбору персоналу ускладнюється, бо замість того, щоб шукати людей, які знають певні фреймворки, потрібно шукати тих, хто добре розуміється в веб-платформі та має потужний багаж знань. Тому автори вважають використання фреймворку є необхідною складовою розробки веб-додатку і основні задачі створення веб-додатку реалізуються правильністю вибору фреймворку.

В результаті наукової роботи було розглянуто фреймворки за певними критеріями та створено веб-додаток, який надає змогу:

- створювати тест;
- поширювати тест;
- проходити тестування;
- отримати результат.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У роботі проведено ретельний аналіз сучасних методик, які сприяють ефективному процесу розробки веб-орієнтованих застосунків та розроблено навчальний веб-додаток з використанням одного з найпопулярніших JavaScript фреймворків – Angular.

4.1 Порівняльний аналіз існуючих фреймворків

Глобальна мережа складається з усіх сайтів, доступних для загального користування. Всі сторінки кожного сайту об'єднуються однією кореневою адресою (те, що ми набираємо в адресному рядку браузера), тематикою, системою і дизайном. Кожна сторінка веб-сайту – це текстовий документ, який написаний на мові програмування (HTML, PHP, Java або інші). Ці текстові файли завантажуються на комп'ютер, обробляються браузером і відображаються на моніторі комп'ютера у вигляді сторінки сайту. Мова програмування дозволяє редагувати текст сторінки, додавати посилання, вставляти картинку, звукові і відео файли. Сторінки сайтів

можуть бути як простими наборами інформації - тексти і картинки, так і складними, з величезною кількістю функцій, які управляються різними програмами.

На 2019 рік найбільш вживаними, актуальними та універсальними фреймворками для розробки зовнішньої частини веб-додатку є [2]:

1. **Angular;**
2. **React;**
3. **Vue.**

Порівняємо ці три фреймворки по наступним критеріям (найбільш вагомими для оцінки фреймворку є наступні метрики):

1. **Тренди пошуку Google (Не найкращий показник, але достатньо ефективний в категорії загальне враження);**
2. **Число завантажень (як спосіб оцінки кількості користувачів які реально використовують фреймворк);**
3. **Вакансії на Indeed (знання фреймворків як одна із вимог до працевлаштування).**

Опишемо ці три критерії окремо, детально проаналізувавши кожен з них.

Тренди пошуку Google. Наведемо на діаграмі та графіку кількість згадувань фреймворків в пошуковій системі Google, синім кольором зображено кількість згадувань фреймворку React, червоним кольором – Angular, жовтим – Vue. Дані наведено за останні п'ять років (наведено в [2]).

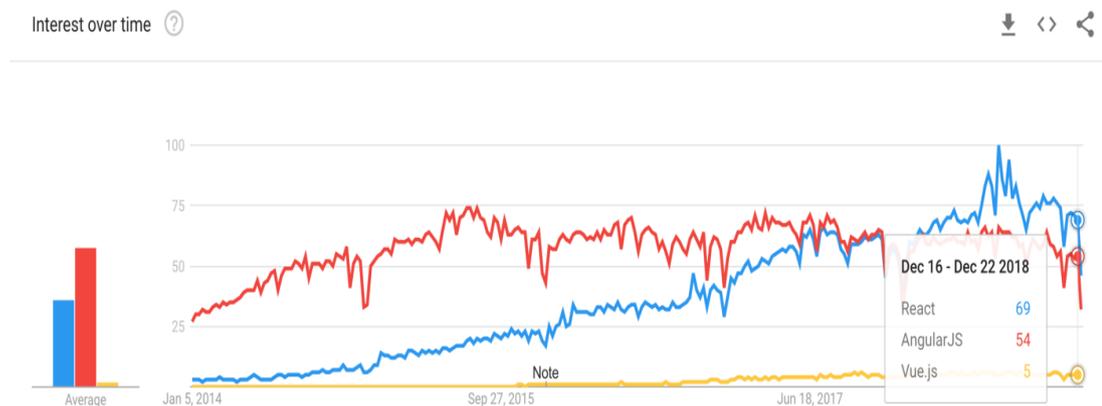


Рис. 1 Кількість пошуку фреймворків за допомогою пошукової системи Google

З січня 2014 року по січень 2017 року фреймворк Angular є лідером за пошуковим запитом, Vue є аутсайдером, а React має позитивну динаміку зростання. Бачимо, що React випереджає Angular в січні 2018 і зберігає лідерство протягом усього року, а Vue покращив свої показники хоча і на відносно незначну позицію.

Проаналізувавши наведені дані, приходимо до висновку, що найбільш оптимальним в категорії тренди пошуку Google є фреймворк React, при цьому, за останні роки, спостерігається тенденція до скорочення розриву між React та Angular.

Число завантажень. Цей параметр дозволяє оцінити реальне використання фреймворку розробниками: установка, необхідність для робочого процесу та актуальність. Далі наведемо діаграму числа завантажень фреймворків. При цьому, синім кольором зображено кількість згадувань фреймворку React, червоним кольором – Angular, жовтим – Vue. Використаємо дані, що наведено в [2].

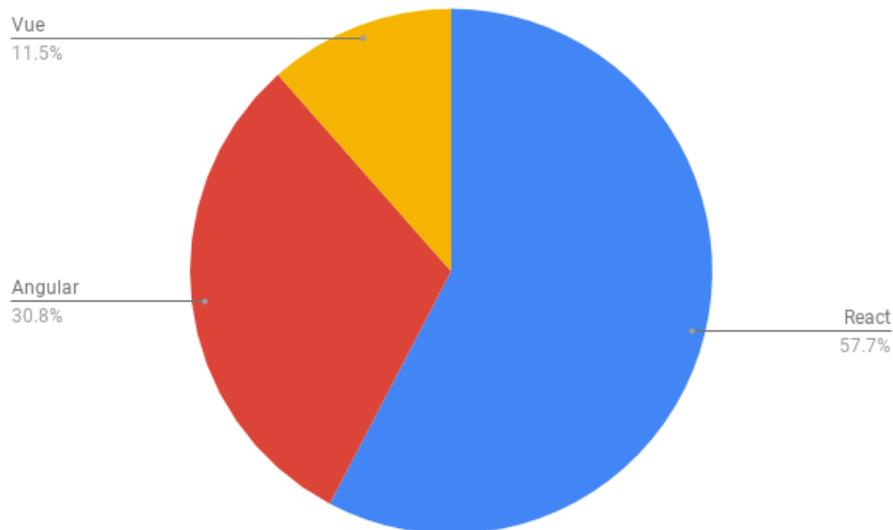


Рис. 2 Число завантажень кожного із даних фреймворків

Бачимо, що знову лідером є React, гідну другу позицію займає Angular, а Vue має 11.5%. Що означає, що найбільш оптимальним в категорії число завантажень є фреймворк React, а на другому місці знаходиться Angular.

Вакансії на Indeed. Останнім часом при працевлаштуванні однією з основних умов, що висувають роботодавці перед веб-розробниками є знання певного набору фреймворків. Тому при дослідженні переваг та недоліків фреймворків варто звертати увагу і на цей показник також. Проаналізувавши наступний критерій, ми зможемо оцінити який саме фреймворк найбільш цікавий для роботодавців. Підрахувавши кількість згадувань фреймворків на веб-сайті Indeed, побудуємо діаграму яка показує який саме із фреймворків є лідером. На 2019 рік результати виглядають так:

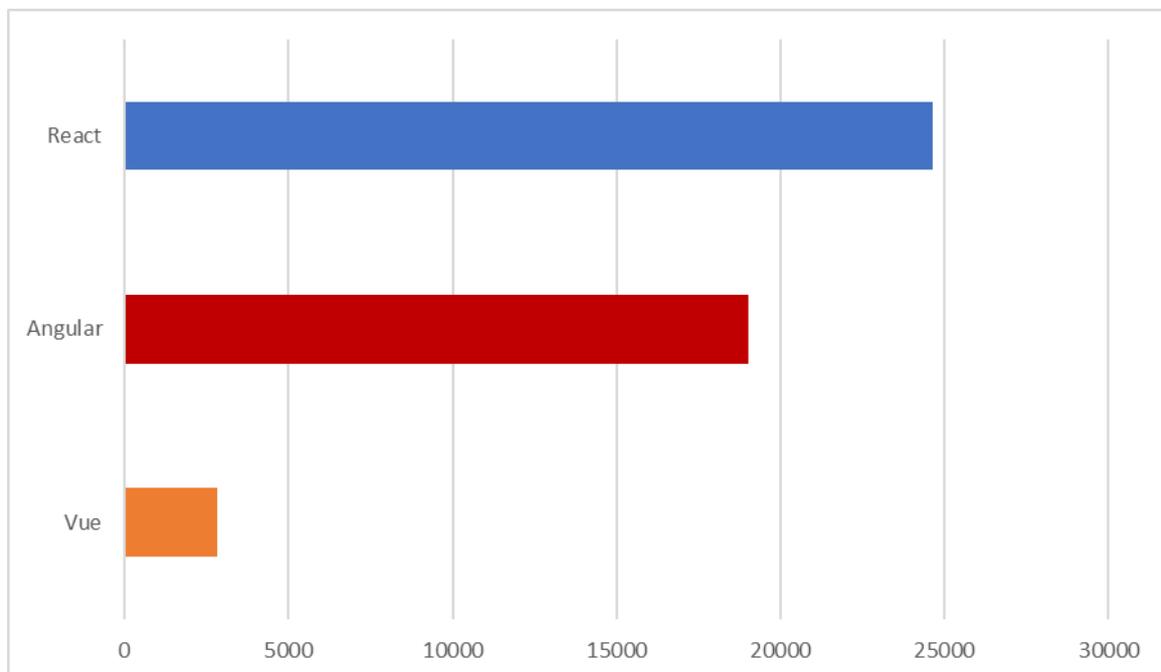


Рис. 3 Загальна кількість згадувань фреймворків в вакансіях на Indeed

З наведених в [3] даних, маємо кількість згадувань у вакансіях:

- **React: 24, 640;**
- **Angular: 19, 032;**
- **Vue: 2, 816.**

З наведеної вище діаграми, отримуємо, що найбільш цікавими фреймворками з точки зору цієї категорії є React та Angular.

Розглянемо більш детально переваги і недоліки кожного із цих фреймворків [4]. Оскільки в попередньому аналізі першість зберігав React, то почнемо з нього.

React. Переваги: Основна перевага React полягає в його порівняльній простоті і в тому, що він спрямований на вирішення однієї задачі, на розробку інтерфейсів. У той час, як для когось-то підхід, пов'язаний з використанням контейнера стану може здатися незнайомим, більшість розробників можуть легко розібратися в цій концепції і зрозуміти переваги архітектури, заснованої на однонаправленому потоці даних, і те, як такий підхід може спростити додатки.

Недоліки і можливі складнощі при впровадженні: Найбільші мінуси React полягають не в особливостях реалізації того, що вони вмюють, а в тому, чого вони не можуть. Для того, щоб створити складне веб-додаток, вам знадобиться багато інших технологій. Як тільки ви відійдете від основних функцій React і пари інших бібліотек, ви зіткнетеся з безліччю думок про «правильних інструментах», з незліченною кількістю рішень та шаблонів, які іноді легко інтегрувати в додаток, а іноді - ні.

Отже, так як React - фреймворк, який зосереджений на вирішенні вузького кола спеціалізованих завдань, недосвідчені команди можуть дуже легко зробити на їх основі щось непідтримуване, не знаючи про те, що рішення, які вони приймають, ведуть до погіршення продуктивності веб-додатків або до помилок. Навіть досвідчені розробники можуть зіткнутися з тим, що недолік чіткого архітектурного планування рішення або строгих правил на початку розробки можуть дуже неприємно позначитися на проекті в майбутньому.

Чому варто обрати саме React? Якщо ви перебуваєте в ситуації, коли ви шукаєте скоріше простий, ніж якийсь всеосяжний фреймворк, тоді, цілком можливо, React добре вам підійде. Крім того, тут слід реалістично дивитися на можливості вашої команди і організації, не тільки на етапі початкової розробки, а й з урахуванням довгострокової підтримки програми.

Angular. Переваги: Головна перевага Angular - це його масштабність. За допомогою цього фреймворку можливо створити веб-додаток практично будь-якої складності. На сьогодні, не існує більш придатних засобів для розробки, великих за обсягом проектів, аніж Angular.

Одна з найголовніших переваг фреймворку – його популярність. Можна говорити про те, що з ним пов'язано ім'я компанії Google і це впливає на те, як його сприймають. Angular 1 швидко став популярним так як ті, хто прийшов з інших середовищ розробки виявили в ньому знайомий шаблон MVC для створення односторінкових додатків. Після модернізації Angular 1 і перепроєктування деяких частин фреймворка, Angular 2+ буквально вистрілив. Вражає число тренінгів по ньому, офіційних і неофіційних. На ринку є серйозна потреба в Angular-розробників. Крім того це - один з небагатьох фреймворків, розглянутих в цьому матеріалі, у якого є офіційний набір багатих можливостями компонентів для створення користувацьких інтерфейсів.

Недоліки і можливі складнощі при впровадженні: На практиці розробникам доводиться вдаватися до чудес винахідливості для того, щоб змусити додаток на Angular робити те, що не є частиною фреймворка. Крім того, знижує інтерес розробників до TypeScript, на якому написаний фреймворк.

Чому варто обрати Angular 2+? Якщо вам потрібно, щоб фахівців з фреймворку було нескладно знайти в необхідних кількостях, і щоб знання цих фахівців можна було використовувати в інших областях, чи вам потрібно підготувати команду до роботи з фреймворком і у вас є певний рівень впевненості в тому, що команда зможе, в короткі терміни, перейти до продуктивної роботи, ви можете зупинитися на Angular 2+. Також, разом з Angular використовується підхід до дизайну Google Material UX, тоді набір компонентів Angular Material - це швидкий, простий і надійний спосіб всім цим скористатися.

Vue.js. Переваги: Ймовірно, головний плюс цього фреймворка полягає в можливості його поступового впровадження. Vue відрізняється зрозумілою і раціональною архітектурою, яку нескладно освоїти і просто застосовувати на практиці.

Існує згуртоване співтовариство ентузіастів і сторонні проекти, які роблять Vue.js ще цікавіше. Крім того, різні розробки, орієнтовані на Vue, досить просто поєднувати в більш складних рішеннях при створенні нових проектів.

Недоліки і можливі складнощі при впровадженні: Одна з головних проблем Vue.js полягає в тому, що проект залежить від однієї людини. Зрозуміло, що інші фреймворки теж від когось залежать, але зазвичай це - організації. Навколо Vue.js склалося велике співтовариство, тут є безліч інноваційних додаткових проектів, але розробка ядра цілком лежить на плечах єдиного розробника.

Ми вважаємо, що добре б побачити в Vue.js інтеграцію нових стандартів, однак зараз в ньому щось на зразок шаблону веб-компонентів, але не самі веб-компоненти, тобто, мова йде скоріше про плани впровадження нових технологій, а не про те, що вже реалізовано.

Чому варто обрати Vue.js? Якщо у вас є старий веб-додаток, якому потрібен більш надійний і сучасний двигун, тоді Vue.js, цілком можливо, добре вам підійде. Він відрізняється чіткими шаблонами, і навіть якщо команда розробників не надто досвідчена, вона зможе легко відокремити правильні підходи від неправильних. Хоча у Vue немає готової до використання стандартної бібліотеки інтерфейсних елементів, існує безліч сторонніх фреймворків, заснованих на Vue, які можуть вам підійти.

Отже, в даному розділі було детально та об'єктивно розглянуто переваги та недоліки актуальних фреймворків.

4.2 Створення навчального веб-додатку

Поставимо задачу створити навчальний веб-додаток для тестування рівня знань. Враховуючи всі вищезгадані переваги та недоліки, а також цілі веб-додатку, було обрано, для виконання поставленої задачі, фреймворк – Angular.

Опишемо ключові концепції фреймворку Angular [4]:

1) Модулі: модулі в AngularJS є контейнерами для різних компонентів програми. Модулі оголошуються за допомогою виклику `angular.module` і підключаються за допомогою директиви `ng-app`.

2) Контролери: контролери в AngularJS містять логіку прив'язану до видів і визначаються функцією-конструктором JavaScript, яка використовується для розширення області видимості (`this`) додатки. Коли контролер прив'язується до об'єктної моделі документа (DOM) фреймворк забезпечить створення нового об'єкта за допомогою наданої функції-конструктора, а також створення нової дочірньої області видимості, яка буде доступна через параметр конструктора `this`.

3) Сервіси: сервіси є взаємозамінні об'єкти, які з'єднуються замість допомогою механізму впровадження залежностей. Сервіси можна використовувати для організації та поділу коду в додатку. Сервіси в Angular використовують шаблон

проектування Singleton (існує тільки один екземпляр сервісу, на який посилаються всі компоненти, від нього залежать).

4) Директиви [3]: директиви це маркери на елементі об'єктної моделі документа (DOM), які вказують компілятору яку поведінку слід прикріпити до даного елемента (наприклад за допомогою слухачів подій) або які правила трансформації треба застосувати до цього елемента.

Етапи розробки веб-додатку:

- затвердження первинного технічного завдання розробки веб-додатку;
- дизайн – створення графічних елементів макету веб-додатку, стилів і елементів навігації;
- розробка програмного коду, модулів, бази даних і інших елементів веб-додатку необхідних в проєкті;
- тестування і розміщення веб-додатку в мережі Інтернет;
- перенесення на хостинг.

Складання технічного завдання (ТЗ). На першому етапі розробки і створення веб-додатку здійснюється проектування інтерфейсу майбутнього ресурсу і складання технічного завдання. Технічне завдання – це основа порядку в роботі над проєктом і головний орієнтир. Тільки з виконання всіх вимог, зазначених у ТЗ, проєкт може вважатися закінченим. Свій відбиток у технічному завданні знаходять завдання, які ставляться перед ресурсом; докладним чином малюється карта веб-додатку, де вказуються всі розділи та формат інформації, що надається на їхніх сторінках. Велика увага в ТЗ приділяється функціоналу проєкту, який описується до дрібниць, а також навігації веб-додатку. Технічне завдання передбачає зазначення вимог до хостингу, верстки, мови програмування. До всього іншого, ТЗ повинно містити й терміни виконання робіт.

Розробка дизайну веб-додатку. Як і розробка веб-додатку в цілому, робота над його дизайном також є поетапною. Першим відбувається створення дизайну головної сторінки ресурсу, починається яке з розробки концепції. Вона створюється на основі ТЗ та спроектованого інтерфейсу.

Верстка сторінок веб-додатку. Після затвердження макетів дизайну всіх сторінок веб-додатку здійснюється їх верстка. Web-сайт застосовує блочну верстку, так як вона надає кращі можливості, ніж таблична, і дозволяє зробити код компактніше, за рахунок чого збільшується швидкість завантаження веб-сторінки. Крім того, блокова верстка дозволяє набагато ефективніше розробляти сайт, який буде коректно відображатися в браузерях. Верстка здійснюється у відповідності з усіма сучасними вимогами, що пред'являються до неї, проходить перевірку на валідність і сумісність з наступними браузерами:

- Internet Explorer версії 11;
- Mozilla Firefox версії 27.0;
- Opera версії 9.0;
- Chrome 37.0;
- Safari версії 6.

Програмування. На основі ТЗ і макетів сторінок веб-додатку здійснюється програмування функціоналу. Результатом етапу є готовий сайт, розміщений на сервері.

Тестування. Для етапу тестування ресурсу передбачена спеціально розроблена методика, за якою і здійснюється перевірка веб-додатку. Перевіряється відповідність веб-додатку описаному в ТЗ функціоналу, коректність відображення верстки у всіх підтримуваних браузерах і відповідність веб-додатку внутрішнім вимогам якості. У разі виявлення зауважень, складається перелік доробок, спрямованих на їх усунення.

Перенесення на хостинг. Підключення до мережі та інших ресурсів для розміщення фізичної інформації на сервері, що постійно перебуває в мережі.

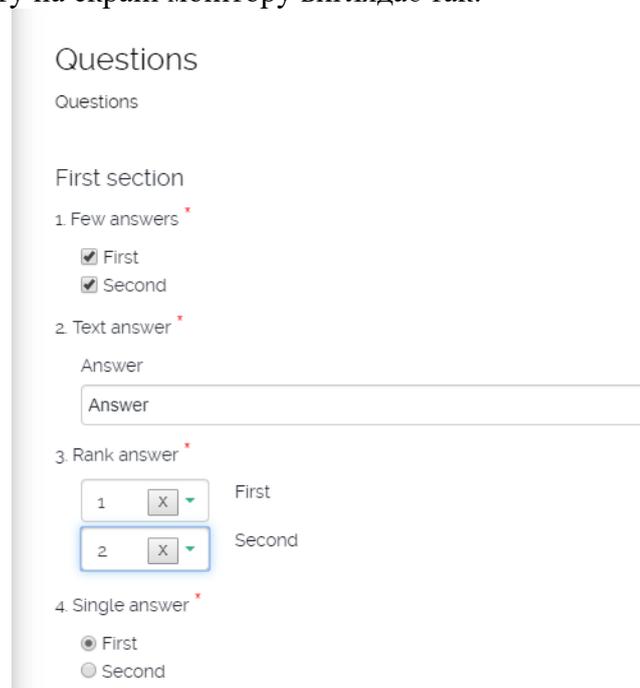
Оскільки метою даної роботи було створення веб-додатку для проходження тестування, то він повинен відповідати певним вимогам, а саме:

- **швидкість;**
- **функціональність;**
- **легкість в розумінні;**
- **доступність.**

І якщо з такими параметрами як швидкість та легкість в розумінні все зрозуміло, то що на рахунок функціональності та доступності? Онлайн-тестування не повинно нічим поступатись традиційним методам проведення тестування. Не повинно бути ніяких рамок або обмежень. Саме тому, при створення тесту, ми розробили чотири типи питання на вибір, а саме:

- **вибір декількох варіантів відповідей із декількох;**
- **текстова відповідь;**
- **вибір числового значення (наприклад, для розставлення подій в хронологічному порядку);**
- **вибір одного варіанту відповіді із декількох.**

Проходження тесту на екрані монітору виглядає так:



The screenshot shows a web interface titled "Questions". Under "First section", there are four question types:

- 1. Few answers**: Two checkboxes labeled "First" and "Second" are both checked.
- 2. Text answer**: A text input field with the placeholder text "Answer".
- 3. Rank answer**: Two options, "1" and "2", each with a dropdown arrow and a label "First" and "Second" respectively. The "2" option is selected and highlighted with a blue border.
- 4. Single answer**: Two radio buttons labeled "First" and "Second". The "First" radio button is selected.

Рис. 4 Проходження тесту з різними типами питання

Однією з переваг веб-додаток є його доступність [4]. Зауважимо, що розроблений веб-додаток дає можливість проходити тестування дистанційно, що є достатньо зручним для користувачів. Онлайн тестування це зручно, просто та ефективно. Для користування додатком необхідно – логін та пароль від аккаунту, ноутбук, смартфон чи настільний персональний комп'ютер та підключення до мережі інтернет.

Створений навчальний веб-додаток було апробовано студентами однієї з навчальних груп університету [5-8]. Викладач та студенти користувались додатком на протязі року. Порівнявши результати сесій (без використання додатку та з ним), ми прийшли до висновку, що успішність студентів групи підвищилась на 13%, якість підвищилась на 17% [9]. Що доводить ефективність використання створеного додатку.

Також в кінці року нами проведено анкетування серед студентів. Основною задачею якого було визначити якими саме недоліками та незручностями у використанні володіє веб-додаток [10]. Після аналізу отриманих анкет стало зрозуміло, що саме потрібно вдосконалити в майбутньому.

5 ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Темою наукового дослідження є система, що дозволяє провести онлайн тестування максимально просто: ви створюєте тест, поширюєте його і отримуєте вже оброблені результати. Більше не потрібно створювати документ, друкувати його, передавати людині для його проходження та обробляти отриману інформацію. Це дає можливість користувачеві пройти опитування в будь-якій точці світу маючи тільки ноутбук або смартфон та підключення до мережі інтернет.

Зараз думки розробників веб-додатків поділяються на тих хто вважає застосування фреймворків ефективним, і тих, хто підтримує ідею відмови від фреймворків. Ідея відмови від фреймворків стає все більш популярною. Але це також не зовсім правильно, на думку авторів відповідь на питання: застосовувати фреймворк чи ні залежить від конкретної ситуації.

В роботі детально розглянуто процес створення клієнтської частини сервісу. В зв'язку з тим, що користувачі навіть у межах локальної мережі бажають використовувати сервіс з різних пристроїв і не бажають встановлювати собі додаткове програмне забезпечення, з'являється потреба у веб-інтерфейсі.

В результаті досліджень в якості фреймворку було обрано Angular, так як він найкраще підходить для розробки клієнтської частини. Авторами створено веб-додаток, який пройшов успішну апробацію та є повноцінною навчальною платформою, на його основі можна створювати інші навчальні тести.

6 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Автор не має відповідних фінансових чи нефінансових інтересів, які слід розкривати.

Література

1. Маньковський А. В. Створення веб-додатку для автоматизованої роботи кадрового агенства. Житомир, 2015 р.
2. Javascript: топ фреймворков для изучения в 2019 году [електронний ресурс]. Режим доступу: <https://medium.com/web-standards/top-js-2019-1116718b2b67>
3. Williamson K., Learning AngularJS. // Williamson K. - O'Reilly Media, 2015 – 212 с.
4. Seshardi S., Angular: Up and Running. // Seshadri S., Green B. - O'Reilly Media, 2014 – 322 с.
5. Ichanska N. Основні аспекти створення мобільних додатків та вибір інструментів їх розробки / N. Ichanska, S. Ulko // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2020. – Т. 1 (59). – С. 74-78. – doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.1.074>.
6. Ichanska N. Застосування освітніх інтернет-ресурсів у навчальній роботі з іноземними студентами / N. Ichanska, S. Sirovuyi // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2020. – Т. 3 (61). – С. 86-89. – doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.3.086>
7. Ichanska N. Оптимальний вибір методів організації інтернет-ресурсів / N. Ichanska // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2019. – Т. 3 (55). – С. 104-109. – doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.3.104>

8. Онищенко С. В. WEB-технології : навч.-метод. комплекс. Бердянськ : «БДПУ», 2016. 500 с.
9. Швець М. Ю., Заруба Д. С., Хохлов Ю. В. Порівняння SQL та NoSQL баз даних. / Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Т. 29 (68) ч. 2. № 6, 2018 С. 21–25.
10. Flanagan D. JavaScript: The Definitive Guide: Master the World's Most-Used Programming Language / David Flanagan.. – 704 с.

References

1. Mankovskyi, A. V. (2015). Development of a web application for automated work of a personnel agency. Zhytomyr
2. Javascript: Top Frameworks to Learn in 2019 [Electronic resource]. Retrieved from <https://medium.com/web-standards/top-js-2019-1116718b2b67>
3. Williamson, K. (2015). Learning AngularJS. O'Reilly Media
4. Seshardi, S., & Green, B. (2014). Angular: Up and Running. O'Reilly Media
5. Ichanska, N., & Ulko, S. (2020). Basic aspects of creating mobile applications and selecting development tools. Systems of Control, Navigation and Communication, 1(59), 74-78. doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.1.074>
6. Ichanska, N., & Sirovyi, S. (2020). Application of educational internet resources in educational work with foreign students. Systems of Control, Navigation and Communication, 3(61), 86-89. doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.3.086>
7. Ichanska, N. (2019). Optimal choice of methods for organizing internet resources. Systems of Control, Navigation and Communication, 3(55), 104-109. doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.3.104>
8. Onyshchenko, S. V. (2016). WEB-technologies: teaching aid. Berdyansk: "BDPU".
9. Shvets, M. Y., Zaruba, D. S., & Khokhlov, Y. V. (2018). Comparison of SQL and NoSQL databases. Scientific Notes of V.I. Vernadsky Taurida National University. Series: Technical Sciences, 29(68) Part 2, No. 6, 21–25.
10. Flanagan, D. (Unknown date). JavaScript: The Definitive Guide: Master the World's Most-Used Programming Language. 704 p.

Ічанська Наталія Василівна

Національний університет полтавська політехніка ім. Юрія Кондратюка,
к. ф.-м.н., доцент
проспект Першотравневий, 24 Полтава, Україна, 36011
ichanska2016@gmail.com
ORCID ID 0000-0001-5963-9288

Для посилань:

Ічанська Н. В. Засоби та інструменти для розробки веб-додатку з тестуванням рівня знань студентів. Механіка та математичні методи, 2024. Т. VI. №. 1. С. 95–106.

For references:

N. Ichanska. (2024). Tools and instruments for developing a web application with student knowledge level testing. Mechanics and Mathematical Methods. VI (1). 95–106.

УДК 004.92:[624.012.45+624.016](624.94)

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ВУЗЛІВ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ КАРКАСНО- МОНОЛІТНИХ БУДІВЕЛЬ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ РОЗРАХУНКУ ТА БУДІВЕЛЬНОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Адаменко В. М.¹, Дзюбко Д. А., Романишен О. В.¹

¹Київський національний університет будівництва та архітектури

Анотація: Сталезалізобетонні каркасно-монолітні будівлі інтегрують в собі переваги сумісної роботи залізобетону та жорсткого армування у вигляді сталевих профілів. Комбінація сталевих профілів, бетону і стержневої арматури має ряд переваг порівняно з звичайними залізобетонними конструкціями, які активно використовуються, зокрема, при зведенні висотних будівель, та дозволяють збільшити міцність і жорсткість елементів конструкцій та, в цілому, забезпечити несучу здатність конструктивних елементів при значно менших їх геометричних розмірах перерізів. Розвиток інформаційних технологій розрахунку будівельних конструкцій, зокрема, методів скінченно-елементного аналізу з використанням 3D скінченних елементів в лінійній та нелінійній постановках задач, а також, технології будівельного інформаційного моделювання, дозволяють досліджувати складні випадки сумісної роботи сталевих жорсткого армування, бетону і стержневої арматури, у тому числі, в вузлах сталезалізобетонних каркасно-монолітних будівель, та виконувати конструювання перерізів в 3D інформаційній моделі з подальшим отриманням конструктивних креслень.

В даній роботі на прикладі 25-ти поверхової сталезалізобетонної каркасно-монолітної будівлі за допомогою інформаційних технологій розрахунку та будівельного інформаційного моделювання досліджено напружено-деформований стан вузлів в лінійній та фізично нелінійній постановках задач. Зокрема, досліджено вузол сполучення трубобетонних колон крайнього ряду в рівні перекриття над першим поверхом з зовнішньою сталевією оболонкою у вигляді труби 630x15 в трьох варіантах: трубобетонні колони (варіант 1), трубобетонні колони з жорстким армуванням перехресними сталевими смугами (варіант 2), трубобетонні колони з жорстким армуванням перехресними двотаврами (варіант 3).

За результатами нелінійних розрахунків для варіанту з трубобетонними колонами без додаткового армування отримано перерозподіл внутрішніх зусиль в колонах порівняно з лінійним розрахунком, зокрема збільшення величини напружень в зовнішній сталевій оболонці близько 24.54% та їх зменшення близько 66.34% в бетонному осерді колон, проте, за наявності додаткового сталевих жорсткого армування такого перерозподілу, зокрема, приросту величин напружень в сталевих елементах колон не відбувається. Середня величина перерозподілу згинальних моментів в плитах перекриття склала 29.7%. З аналізу величин напружень в сталевій оболонці і сталевому жорсткому армуванні колон, отриманих з нелінійного розрахунку, підтверджено закономірність до їх зниження зі зростанням величини сталевих жорсткого армування, з величини 326 МПа (для варіанту 1) до 255 МПа (для варіанту 2) і 216 МПа (для варіанту 3).

Ключові слова: інформаційні технології, будівельне інформаційне моделювання, 3D моделювання, BIM-технології, BIM моделювання, BIM, залізобетонні конструкції, сталезалізобетонні конструкції, залізобетонні каркасно-монолітні будівлі, сталезалізобетонні каркасно-монолітні будівлі, вузли каркасно-монолітних будівель, лінійний статичний розрахунок, фізично нелінійний статичний розрахунок.

STRESS-STRAIN STATE INVESTIGATION OF NODES OF COMPOSITE STEEL-REINFORCED CONCRETE FRAME-MONOLITHIC BUILDINGS USING INFORMATION TECHNOLOGY FOR STRUCTURAL ANALYSIS AND BUILDING INFORMATION MODELING

V. Adamenko¹, D. Dziubko¹, O. Romanyshen¹

¹*Kyiv National University of Construction and Architecture*

Abstract: Composite steel-reinforced concrete frame-monolithic buildings integrate the advantages of combined work of concrete and rigid reinforcement in the form of steel profiles. The combination of steel profiles, concrete, and reinforcement bars has several advantages compared to conventional reinforced concrete structures, particularly in the construction of high-rise buildings, allowing for increased strength and stiffness of structural elements and overall load-bearing capacity with significantly smaller geometric dimensions of cross-sections. The development of information technologies for structural analysis, including finite element methods using 3D finite elements in linear and nonlinear problem formulations, as well as building information modeling technology, enables the investigation of complex cases of interaction between steel rigid reinforcement, concrete, and reinforcement bars, including in the nodes of steel-reinforced concrete frame-monolithic buildings, and allows for designing cross-sections in a 3D information model with subsequent generation of construction drawings.

In this study, using information technologies for structural analysis and building information modeling, the stress-strain state of nodes is investigated in both linear and physically nonlinear problem formulations, taking the example of a 25-story steel-reinforced concrete frame-monolithic building. Specifically, the node connection of tubular concrete columns at the outer row at the level of the floor above the first level with an external steel shell in the form of a tube 630x15 is examined in three variants: tubular concrete columns (variant 1), tubular concrete columns with rigid reinforcement by cross steel strips (variant 2), tubular concrete columns with rigid reinforcement by cross I-beams (variant 3).

Based on the results of nonlinear analysis, for the variant with tubular concrete columns without additional reinforcement, a redistribution of internal forces in the columns compared to linear analysis is observed. Particularly, there is an increase in stress magnitude in the external steel shell by approximately 24.54% and a decrease by about 66.34% in the concrete core of the columns. However, in the presence of additional steel rigid reinforcement, such redistribution, including the increase in stress magnitude in the steel elements of the columns, does not occur. The average redistribution of bending moments in the floor slabs amounted to 29.7%. An analysis of stress values in the steel shell and steel rigid reinforcement of the columns obtained from nonlinear analysis confirms a tendency for their decrease with increasing magnitude of steel rigid reinforcement, ranging from 326 N/mm² (for variant 1) to 255 N/mm² (for variant 2) and 216 N/mm² (for variant 3).

Keywords: information technologies, building information modeling, 3D modeling, BIM technologies, BIM modeling, BIM, reinforced concrete structures, composite steel-reinforced concrete structures, reinforced concrete frame-monolithic buildings, composite steel-reinforced concrete frame-monolithic buildings, nodes of frame-monolithic buildings, linear structural analysis, physically nonlinear structural analysis.

1 ВСТУП

Сталезалізобетонні каркасно-монолітні будівлі інтегрують в собі переваги сумісної роботи залізобетону та жорсткого армування у вигляді сталевих профілів. Комбінація сталевих профілів, бетону і стержневої арматури має ряд переваг порівняно з звичайними залізобетонними конструкціями, які активно використовуються, зокрема, при зведенні висотних будівель, та дозволяють збільшити міцність і жорсткість елементів конструкцій та, в цілому, забезпечити несучу здатність конструктивних елементів при значно менших їх геометричних розмірах перерізів. Розвиток інформаційних технологій розрахунку будівельних конструкцій, зокрема, методів скінченно-елементного аналізу з використанням 3D скінченних елементів в лінійній та нелінійній постановках задач, а також, технології будівельного інформаційного моделювання, дозволяють досліджувати складні випадки сумісної роботи сталевих жорсткого армування, бетону і стержневої арматури, у тому числі, в вузлах сталезалізобетонних каркасно-монолітних будівель, та виконувати конструювання перерізів в 3D інформаційній моделі з подальшим отриманням конструктивних креслень.

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

В роботі [1] на основі розробленої нелінійної 3D скінченно-елементної моделі в ПК ABAQUS досліджено поведінку двох залізобетонних балок, що завантажені в чотирьох точках при дії змінних циклів завантаження - розвантаження. Отримані результати були звірені з результатами експериментальних досліджень залізобетонних балок. Автори роботи [2], за допомогою прикладного пакету скінченно-елементного моделювання FEMAP, виконали моделювання пошкоджених залізобетонних балок прольотом 1900 мм, розглянуто шість варіантів пошкоджень балок, які моделювалися за рахунок видалення скінченних елементів балок. Числові дослідження залізобетонних балок без попереднього напруження та попередньо напружених із зовнішнім армуванням балок проведені в роботі [3] на основі скінченно-елементної моделі в ПК ABAQUS в припущенні сумісності деформацій бетону і сталевих армувань. Отримані результати міцності бетону, напружень в зовнішніх сталевих стержнях, прогинів, картин тріщиноутворення співставлялися з результатами експериментальних досліджень балок. Автори роботи [4] запропонували нелінійну скінченно-елементну модель для розрахунку попередньо напружених залізобетонних балок, в якій попередньо напружена арматура моделюється полігональними скінченними елементами, що знаходяться в товщі залізобетонної балки.

Числовому моделюванню залізобетонної плити товщиною 200мм та розмірами 5x7м, з різними граничними умовами на контурі, присвячена робота [5], яка була проведена за допомогою ПК Autodesk Robot Structural Analysis Professional, ПК Dlubal Software RFEM і ПК ABC Plate в нелінійній постановці задачі. Методика експериментальних досліджень деформованого стану монолітного ребристого перекриття силосу та чисельне моделювання його напружено-деформованого стану представлено в роботах [6, 7]. В роботі [8], на прикладі моделювання залізобетонної плити в ПК Ліра-САПР, для різних варіантів граничних умов на контурі, показано, що крутні моменти в залізобетонних плитах при розрахунках на основі моделі із плоских скінченних елементів можуть суттєво відрізнятись від фактичних крутних моментів. Це в свою чергу може призвести до помилок при визначенні головних моментів, і далі, помилок при визначенні моменту тріщиноутворення та величин прогинів. Автори дослідження [9] за допомогою ПК SAP2000 виконали моделювання залізобетонних

ребристих та кесонних плит перекриттів в лінійній та нелінійній постановці задач. Для розрахунку використані багатошарові скінченні елементи, що включали верхній шар бетону, шар армування та нижній шар бетону. Фізико-механічні характеристики бетону і арматури відповідали значенням прийнятим при натурних дослідженнях залізобетонних плит, проведених іншими авторами. За результатами дослідження, представлено порівняльний аналіз отриманих результатів чисельних розрахунків з результатами розглянутих варіантів експериментальних досліджень.

Вплив підвищених температур на нерозрізну статично невизначену залізобетонну балку був досліджений в роботі [10]. 3D скінченно-елементна модель побудована в ПК ABAQUS та в першу чергу використана для розрахунків залізобетонної балки на термічні впливи, на наступному кроці, було безпосередньо проведено статичний розрахунок балки в нелінійній постановці задачі. Результати числових досліджень співставлені з натурними випробуваннями залізобетонних балок, приведено аналіз перерозподілу згинальних моментів у балках при впливі підвищених температур. Числове моделювання за допомогою спеціально розробленого програмного комплексу скінченно-елементного аналізу сталезалізобетонної восьмиповерхової каркасної будівлі із широко відомих натурних випробувань каркасних будівель на вплив пожежі (Cardington Corner fire test), які були проведені в м. Кардінгтон з 1994 по 1997 роки міжнародними компаніями BRE та British Steel (зараз Tata Steel), було проведено автором в роботі [11]. За результатами зроблено висновок, що для якісного врахування в розрахунках мембранного ефекту в залізобетонних плитах при їх великих переміщеннях, варто розробити більш досконалий механізм чисельного моделювання. Подібні дослідження [12], проте в даному випадку, за допомогою комерційного програмного комплексу ABAQUS, були проведені також для сталезалізобетонної восьмиповерхової каркасної будівлі із третього тесту натурних випробувань в м. Кардінгтон (Cardington Corner fire test). Об'єктно-орієнтований фреймворк OpenSees, що дає можливість користувачам створювати скінченно-елементні додатки для моделювання роботи конструктивних елементів, дозволив авторам роботи [13] розробити застосунок, в якому було реалізовано термомеханічний багатошаровий нелінійний скінченний елемент оболонки, що дозволяє моделювати досить великі переміщення в плитах, які виникають за умов температурних впливів, а також, враховувати пластичність та теплове розширення. Результати роботи додатку були підтверджені шляхом моделювання роботи залізобетонних плит при впливах підвищених температур та їх зв'язки з широко відомими результатами натурних випробувань будівельних конструкцій на вплив пожежі, які були проведені в м. Кардінгтон (Cardington Corner fire test). Розроблений додаток з відкритим доступом дозволяє дослідникам і інженерам проводити розрахунки залізобетонних плит за умов термічних впливів. В публікації [14] запропоновано та теоретично обгрунтовано використання приведенного перерізу при скінченно-елементному аналізі сталезалізобетонних плит за умов температурних впливів, що дозволяє спростити розрахунок сталезалізобетонних плит при термічних впливах до рівня розрахунку звичайних залізобетонних плит.

Розвиток методів розрахунку і конструювання сталевих будівель і споруд проаналізовано в роботі [15]. На прикладі Ейфелевої вежі, яка на момент зведення була найвищою у світі вежею (312.12м), та Національного стадіону сингапурського спортивного комплексу, який є найбільшим у світі сталевим куполом (діаметр 310м), прослідковано зміну підходів до розрахунку і конструювання сталевих будівель та споруд, розглянуто традиційні ручні підходи до проектування будівель, та сучасні інформаційні технології розрахунку та конструювання сталевих конструкцій. В роботі [16] за допомогою ПК Dlubal RSTAB та ПК Dlubal RFEM, виконано моделювання напружено-деформованого стану, а також підбір перерізів складних просторових

сталевих конструкцій аеропорту відповідно до норм Єврокод. Вітрові навантаження, які діють на будівлю визначені з використанням віртуальної аеродинамічної труби та акселерограм, за допомогою CFD-аналізу в ПК Dlubal RWIND Simulation.

Автори роботи [17] за допомогою ПК ABAQUS побудували скінченно-елементну модель для розрахунку центрально-стиснутих трубобетонних колон. В даному випадку застосовані чотирьохвузлові скінченні елементи оболонки та восьмивузлові просторові скінченні елементи. Для верифікації коректності отриманих результатів було зібрано і використано залежності $N-\epsilon$ або $N-\Delta$ для 142-х круглих, 154-х квадратних та 44-х прямокутних зразків трубобетонних колон. В праці [18] запропонована нова скінченно-елементна модель для розрахунку круглих позацентрово-стиснутих трубобетонних колон, приведені теоретичні залежності і обґрунтування запропонованої методики, верифікація результатів розрахунку виконана на основі 95-ти натурних випробувань трубобетонних колон інших дослідників. В роботі [19] за допомогою ПК ABAQUS розроблена нелінійна 3D скінченно-елементна модель для коротких трубобетонних колон. Розрахунки проведені відповідно до вимог Єврокод 4, додатково, результати розрахунків були звірені з даними експериментальних досліджень інших авторів. Дослідження трубобетонних центрально-стиснутих колон круглого та квадратного перерізу з діаметром (стороною) 150мм за допомогою ПК ABAQUS представлено в роботі [20]. В даному випадку, розглянуто також варіанти армування трубобетонних колон жорсткою арматурою у вигляді хрестового елемента, а також, швелероподібного для колон квадратного перерізу. Верифікація скінченно-елементної моделі виконана шляхом співставлення результатів з даними експериментальних досліджень інших авторів.

На основі даних отриманих при реалізації 35-ти будівельних проєктів автори роботи [21] продемонстрували переваги використання будівельного інформаційного моделювання, серед них, зокрема, зменшення вартості проєкту в цілому, більш якісний контроль, зменшення тривалості проєктування, більш якісна взаємодія між фахівцями різних розділів проєкту. В роботі [22], на основі огляду більш ніж 250 публікацій, автори представили детальний аналіз поточного стану застосування технологій будівельного інформаційного моделювання при проєктуванні, зведенні і експлуатації будівель, розглянули основних виробників програмного забезпечення і їхні основні продукти, зокрема, Autodesk Revit, Navisworks, Bentley Architecture, Graphisoft ArchiCAD, Tekla, Nemetschek Allplan. Акцентовано увагу на досить низький відсоток використання будівельного інформаційного моделювання при експлуатації, реконструкції та демонтажі будівель. Переваги та поточний стан інтеграції технологій будівельного інформаційного моделювання в будівельну галузь на рівні архітекторів, інженерів та лінійних інженерно-технічних працівників проаналізовано в роботі [23].

Приклад сумісного використання інформаційних технологій розрахунку та будівельного інформаційного моделювання при проєктуванні залізобетонних і сталезалізобетонних каркасних будівель приведений в роботі [24]. Досвід впровадження будівельного інформаційного моделювання в навчальний процес при реалізації освітньої програми підготовки інженерів-будівельників, в роботі [25]. Досвід створення 3D інформаційної моделі існуючої історичної будівлі 16-го століття (Palace Ettoreo in Sacile, Італія) на основі даних лазерного сканування, за допомогою 3D моделювання в ПК EasyCUBE Virtualgeo та ПК Revit приведений в праці [26]. За допомогою будівельного інформаційного моделювання в ПК Revit, разом із застосуванням технології Dypamo, автори роботи [27] привели приклад проєктування сталезалізобетонних балок мосту. Окрім цього, продемонстровано імпорт інформаційної моделі в ПК ABAQUS для подальшого скінченно-елементного аналізу конструкцій. В роботі [28] на основі побудованих 3D будівельних інформаційних моделей виконана систематизація та запропоновані нові види вузлових з'єднань

сталезалізобетонних конструкцій. Дослідження виконано на основі існуючих прототипів будівель. Питання армування залізобетонних конструкцій розглянуто в роботах [29, 30]. Автори дослідження [29] запропонували автоматизувати процес армування залізобетонних плит. В даному алгоритмі спочатку отримується необхідна вихідна інформація з будівельної інформаційної моделі та скінченно-елементної моделі. На першому кроці виконується розкладання армування відповідно до результатів розрахунків, на другому, оптимізація його розміщення. Приведені практичні приклади роботи запропонованого алгоритму. В роботі [30] запропоновано спосіб армування залізобетонних конструкцій на основі інформації отриманої з будівельної інформаційної моделі, шляхом її оптимізації за допомогою генетичного алгоритму. Спеціально розроблений для цієї цілі фреймворк, що отримує інформацію з будівельної інформаційної моделі, виконує покрокове розкладання армування, відповідно поздовжньої розтягнутої, поздовжньої стиснутої та поперечної, а також дозволяє виконати 3D візуалізацію отриманого результату.

3 ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Ціллю роботи є дослідження напружено-деформованого стану вузлів сталезалізобетонних каркасно-монолітних будівель на прикладі 25-ти поверхової будівлі за допомогою інформаційних технологій розрахунку та будівельного інформаційного моделювання, а також, виявлення ефектів, які виникають при розрахунках сталезалізобетонних каркасно-монолітних будівель у лінійній та фізично нелінійній постановках задач.

Задачами дослідження є:

- створення за допомогою об'ємних скінченних елементів уточненої розрахункової моделі на основі загальної скінченно-елементної моделі сталезалізобетонної каркасно-монолітної будівлі, яка враховує дійсний напружено-деформований стан вузлів, у лінійній та фізично нелінійній постановці задач;
- розрахунок уточненої скінченно-елементної моделі у лінійній та фізично нелінійній постановці задач, а також, аналіз отриманих результатів напружено-деформованого стану вузлів.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Розглядається 25-ти поверхова сталезалізобетонна каркасно-монолітна будівля з габаритними розмірами в плані 14x30.6 м, висотою поверхів 3.3 м, з підвальним, цокольним та технічним поверхами. Вся необхідна інформація щодо послідовності створення будівельної інформаційної моделі в ПК САПФІР та розрахункової моделі в ПК Ліра-САПР, прийнятих характеристиках жорсткості та додаткових розрахункових даних приведена в роботі [24].

За результатами розрахунку скінченно-елементної моделі сталезалізобетонного каркасу з трубобетонними колонами в ПК Ліра-САПР отримані внутрішні зусилля в конструктивних елементах каркасу, виконаний підбір перерізів трубобетонних колон та армування залізобетонних стін і плит перекриття. Для подальших досліджень був обраний вузол сполучення трубобетонних колон крайнього ряду в рівні перекриття над першим поверхом з зовнішньою сталевією оболонкою у вигляді труби 630x15 в трьох варіантах: трубобетонні колони (варіант 1), трубобетонні колони з жорстким армуванням перехресними сталевими смугами (варіант 2), трубобетонні колони з жорстким армуванням перехресними двотаврами (варіант 3).

При побудові уточненої розрахункової моделі в лінійній постановці задачі, колони першого і другого поверхів, які примикають до вказаного вузла, були виконані з

універсальних просторових восьмивузлових (№36) та шестивузлових (№34) ізопараметричних скінченних елементів. Розмір сторони для більшості скінченних елементів склав 60мм. Зовнішня сталева оболонка має товщину, що відповідає товщині труби (15мм) і змодельована у вигляді суцільного масиву разом із внутрішнім бетонним осердям. Скінченно-елементна модель залізобетонної плити, що виконана з універсальних прямокутних (№41), чотирикутних (№44) та трикутних (№42) скінченних елементів оболонки, в межах примикання до 3D просторових скінченних елементів колон, була модифікована для забезпечення сумісності вузлів. Будівельна інформаційна модель вузла варіанту 1 у ПК Tekla Structures приведена на Рис. 1.

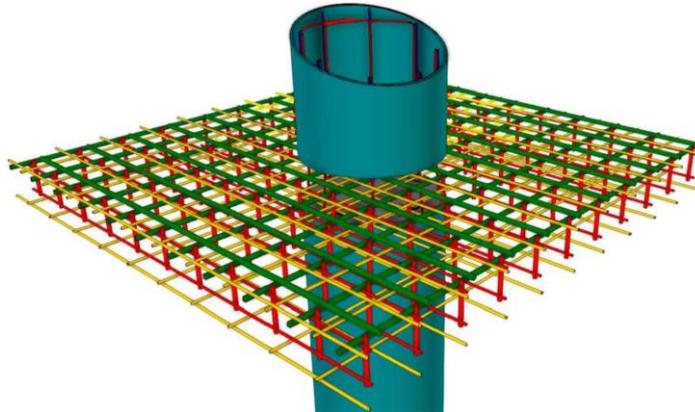
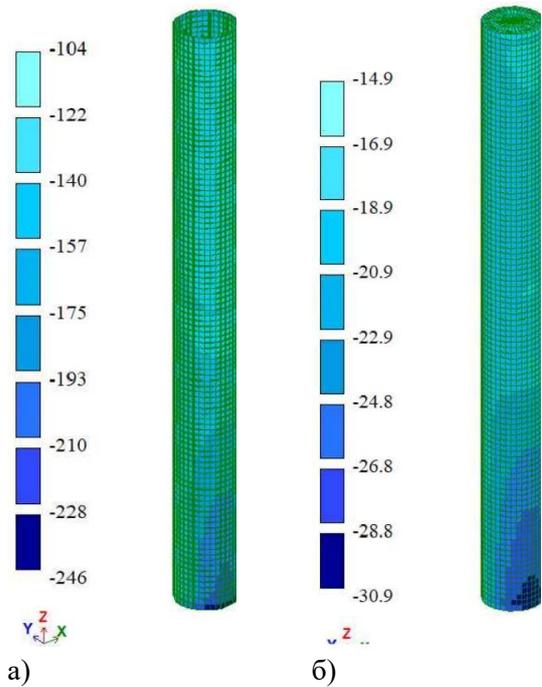


Рис. 1. Будівельна інформаційна модель вузла варіанту 1 у ПК Tekla Structures

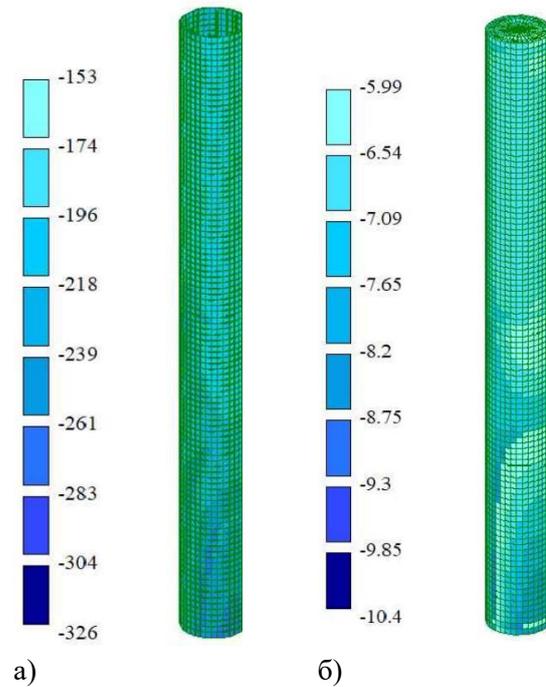
Побудова уточненої розрахункової моделі в нелінійній постановці задач, виконана на основі відповідної лінійної моделі. В даному випадку, конструктивні елементи монолітного розтертку, зовнішніх стін і стін ядра жорсткості, монолітних сходових маршів і площадок, плит перекриття змодельовані фізично нелінійними універсальними прямокутними (№241), чотирикутними (№244) та трикутними (№242) скінченними елементами оболонки. Колони першого і другого поверхів, які примикають до розглядуваного вузла, були змодельовані фізично нелінійними універсальними просторовими восьмивузловими (№236) та шестивузловими (№234) ізопараметричними скінченними елементами.

Фізично нелінійні скінченні елементи № 241, 242 і 244 є багатошаровими скінченними елементами, відповідно, наявність армування плит перекриття задана у вигляді відповідних шарів армування, розміщених у верхній та нижній зонах плити перекриття. Товщина плит перекриття прийнята 250мм. Нелінійні параметри бетону і арматури плит перекриття та колон задані у вигляді закону нелінійного деформування №14 відповідно для бетону класу C32/40, арматури класу A500C і класу сталі C285. Моделювання нелінійних завантажень виконано покроковим методом, прийнято 10 рівномірних кроки завантаження розрахункової моделі.

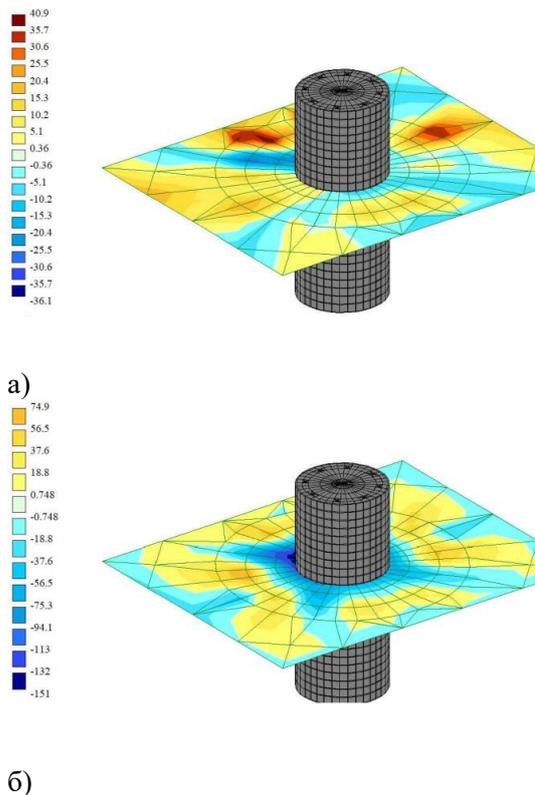
Для вузла сталезалізобетонної каркасно-монолітної будівлі варіанту 1 (трубобетонні колони), мозаїка еквівалентних напружень N_z для сталевих оболонок і бетонного осердя за результатами лінійних та нелінійних розрахунків приведена на рис.2 і 3, мозаїка еквівалентних напружень M_x і M_y в плиті перекриття за результатами лінійних та нелінійних розрахунків приведена на рис.4 і 5. Результати розрахунків внутрішніх зусиль (напружень) для вузла сталезалізобетонної каркасно-монолітної будівлі варіанту 1 (трубобетонні колони) в лінійній та нелінійній постановках задач, а також, їх різниця приведені в таблиці 1.



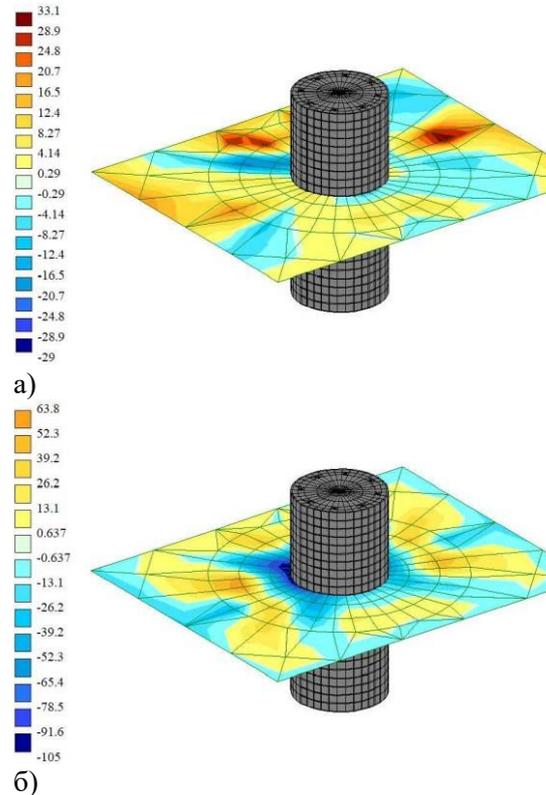
а) б)
Рис. 2. Мозаїка еквівалентних напружень N_z за результатами лінійних розрахунків вузла варіанту 1 (трубобетонні колони), Н/мм² (а — сталева оболонка, б — бетонне осердя)



а) б)
Рис. 3. Мозаїка еквівалентних напружень N_z за результатами нелінійних розрахунків вузла варіанту 1 (трубобетонні колони), Н/мм² (а — сталева оболонка, б — бетонне осердя)



а) б)
Рис. 4. Мозаїка еквівалентних напружень M_x (а) і M_y (б) в плиті за результатами лінійних розрахунків вузла варіанту 1, (кН*м)/м.п.



а) б)
Рис. 5. Мозаїка еквівалентних напружень M_x (а) і M_y (б) в плиті за результатами нелінійних розрахунків вузла варіанту 1, (кН*м)/м.п.

Таблиця 1

Внутрішні зусилля (напруження) у вузлі варіанту 1 (трубобетонні колони)									
Внутрішні зусилля, напруження	Сталева оболонка		Δ , %	Бетонне осердя		Δ , %	Плита перекриття		Δ , %
	ліній.	нелін.		ліній.	нелін.		ліній.	нелін.	
N_x , Н/мм ²	-76,1	-71,8	5,99	-5,58	-2,57	53,94	-23,5	-4,06	82,72
N_y , Н/мм ²	-50,6	-99,5	49,15	-25,2	-2,72	89,21	-4,1	-50,9	-92,94
N_z , Н/мм ²	-246	-326	24,54	-30,9	-10,4	66,34	-	-	-
M_x , (кН*м)/м.п.	-	-	-	-	-	-	40,9	33,1	19,07
M_y , (кН*м)/м.п.	-	-	-	-	-	-	-151	-105	43,81
M_{xy} , (кН*м)/м.п.	-	-	-	-	-	-	-58,7	-50	14,82

Будівельна інформаційна модель вузла варіанту 2 та варіанту 3 у ПК Tekla Structures приведена на рис. 6.

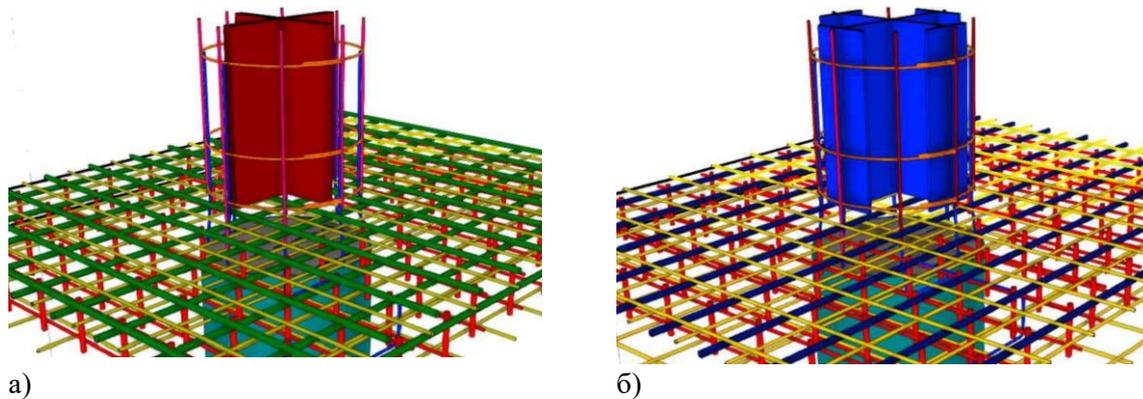


Рис. 6. Будівельна інформаційна модель вузла варіанту 2 (а) та варіанту 3 (б) у ПК Tekla Structures

Мозаїка еквівалентних напружень N_z для сталевої оболонки і сталевому жорсткому армування та бетонного осердя за результатами лінійних та нелінійних розрахунків приведена для вузла варіанту 2 на рис.7 і 8, для вузла варіанту 3 на рис. 11 і 12. Мозаїка еквівалентних напружень M_x і M_y в плиті перекриття за результатами лінійних та нелінійних розрахунків приведена для вузла варіанту 2 на рис.9 і 10, для вузла варіанту 3 на рис. 13 і 14. Результати розрахунків внутрішніх зусиль (напружень) для вузла варіантів 2 та 3, а також, їх різниця приведені в таблицях 2 і 3 відповідно.

5 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

При нелінійних розрахунках порівняно з лінійними, для варіанту 1 (табл. 1) спостерігається збільшення напружень N_z в сталевій оболонці близько 24.54% та їх зменшення близько 66.34% в бетонному осерді колон. Для варіанту 2 та варіанту 3 аналогічного приросту напружень N_z в сталевій оболонці і сталевій жорсткій арматурі не відбувається, натомість їх зменшення в бетонному осерді колон становить близько 70.58 та 63.43% відповідно. Зменшення згинальних моментів в плитах перекриття для варіанту 1 складає близько 19.07% (M_x) і 43.81% (M_y), для варіанту 2 близько 61.31% (M_x) і 24.83% (M_y), для варіанту 3 близько 13.35% (M_x) і 15.95% (M_y).

З аналізу величин напружень N_z в сталевій оболонці і сталевому жорсткому армуванні, отриманих за результатами нелінійного розрахунку, спостерігається чітка закономірність до їх зниження зі зростанням величини сталевому жорсткому армування, 326 МПа (для варіанту 1), 255 МПа (для варіанту 2), 216 МПа (для варіанту 3).

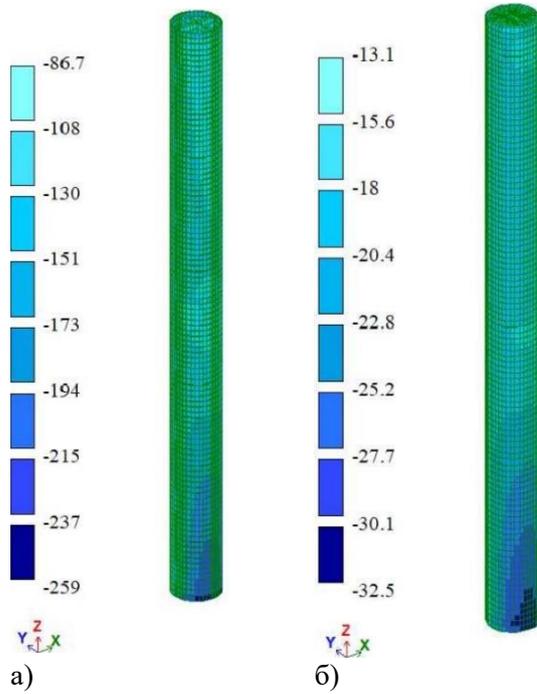


Рис. 7. Мозаїка еквівалентних напружень N_z за результатами лінійних розрахунків вузла варіанту 2 (перехресні смуги), Н/мм² (а — сталеве армування, б — бетонне осердя)

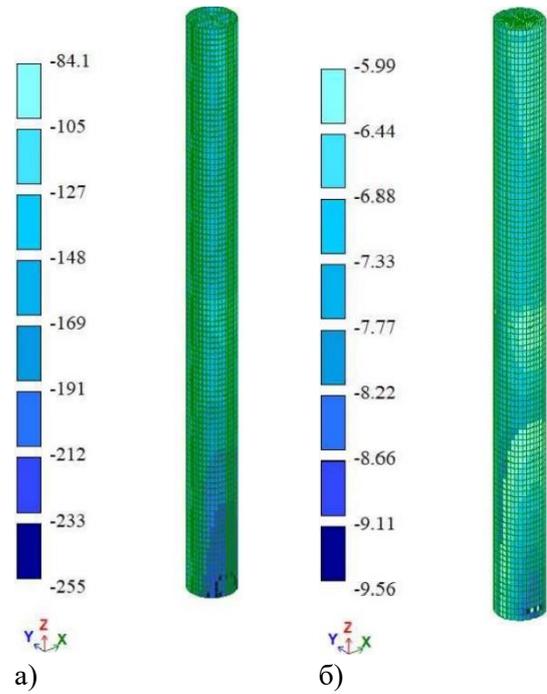


Рис. 8. Мозаїка еквівалентних напружень N_z за результатами нелінійних розрахунків вузла варіанту 2 (перехресні смуги), Н/мм² (а — сталеве армування, б — бетонне осердя)

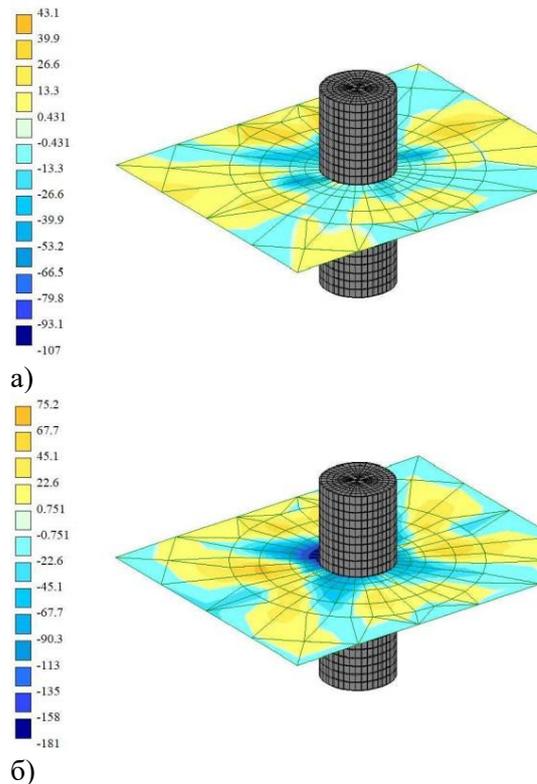


Рис. 9. Мозаїка еквівалентних напружень M_x (а) і M_y (б) в плиті за результатами лінійних розрахунків вузла варіанту 2, (кН*м)/м.п.

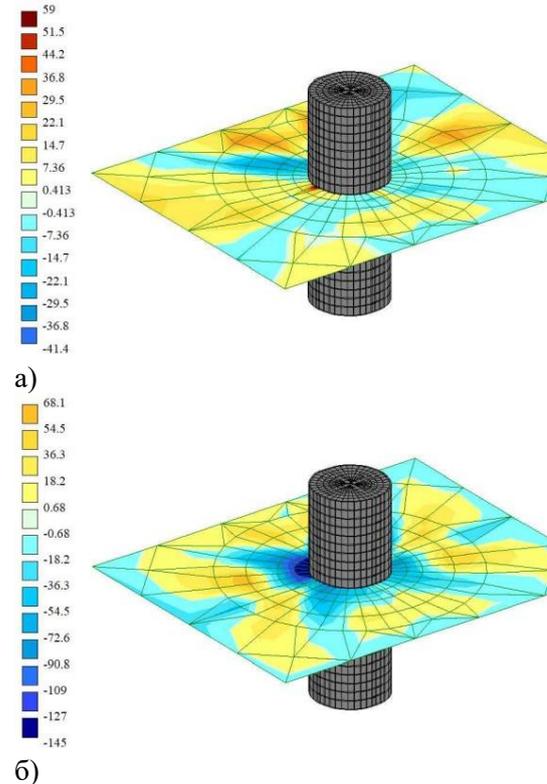
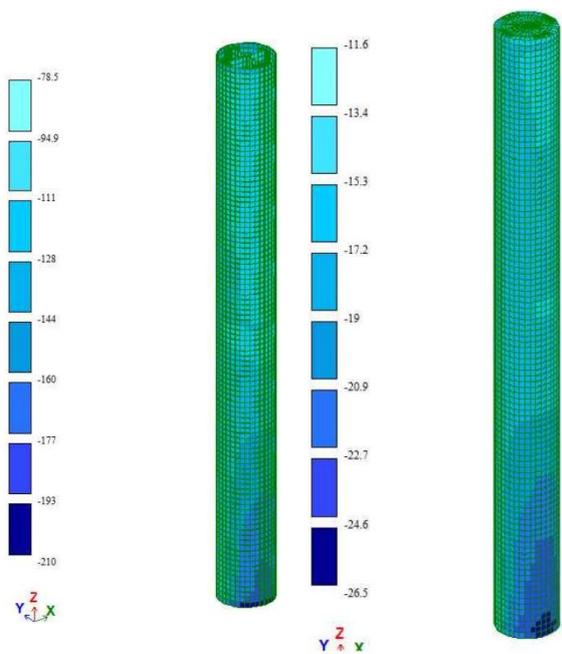
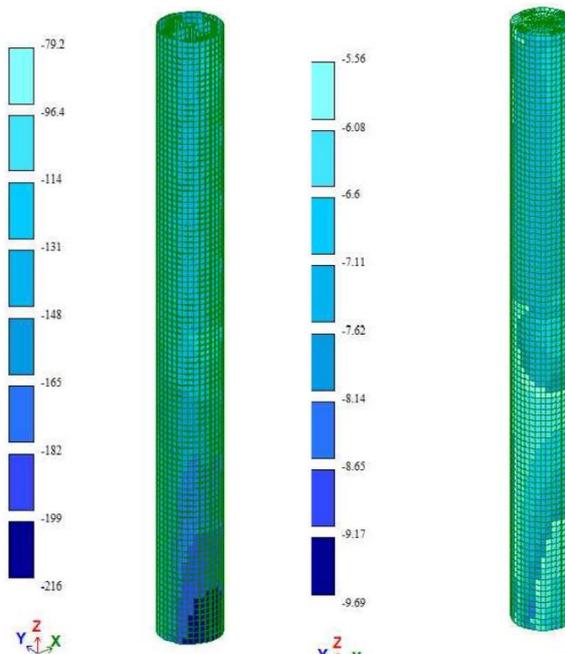


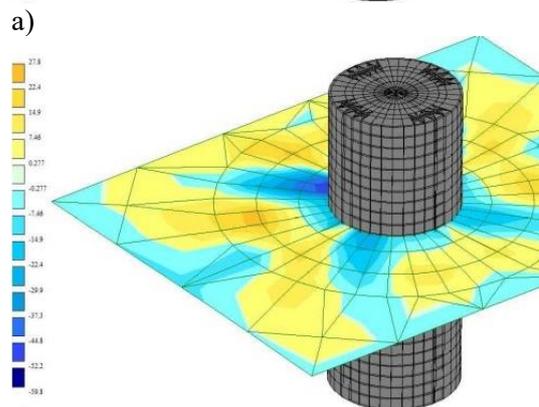
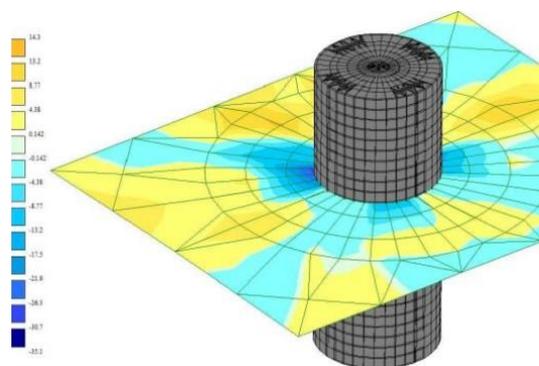
Рис. 10. Мозаїка еквівалентних напружень M_x (а) і M_y (б) в плиті за результатами нелінійних розрахунків вузла варіанту 2, (кН*м)/м.п.



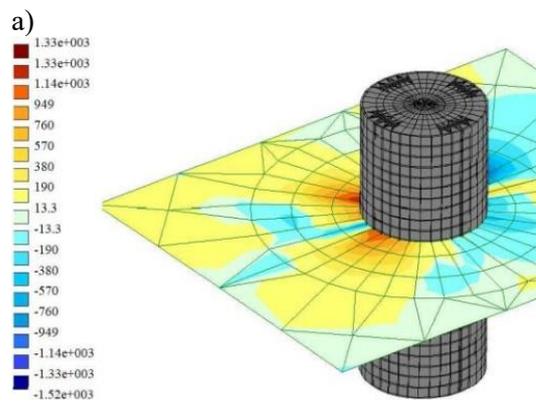
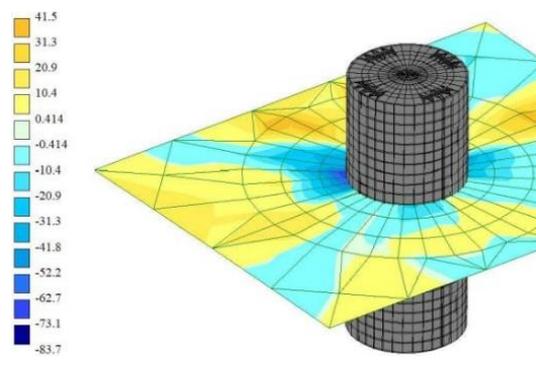
а) б)
Рис. 11. Мозаїка еквівалентних напружень N_z за результатами лінійних розрахунків вузла варіанту 3 (перехресні двотаври), Н/мм² (а — сталеве армування, б — бетонне осердя)



а) б)
Рис. 12. Мозаїка еквівалентних напружень N_z за результатами нелінійних розрахунків вузла варіанту 3 (перехресні двотаври), Н/мм² (а — сталеве армування, б — бетонне осердя)



а) б)
Рис. 13. Мозаїка еквівалентних напружень M_x (а) і M_y (б) в плиті за результатами лінійних розрахунків вузла варіанту 3, (кН*м)/м.п.



а) б)
Рис. 14. Мозаїка еквівалентних напружень M_x (а) і M_y (б) в плиті за результатами нелінійних розрахунків вузла варіанту 3, (кН*м)/м.п.

Таблиця 2

Внутрішні зусилля (напруження) у вузлі варіанту 2 (перехресні смуги)

Внутрішні зусилля, напруження	Сталеве армування		Δ , %	Бетонне осердя		Δ , %	Плита перекриття		Δ , %
	ліній.	нелін.		ліній.	нелін.		ліній.	нелін.	
N_x , Н/мм ²	-76,4	-80,4	4,97	-5,8	-6,53	11,18	-20,8	-31,7	34,38
N_y , Н/мм ²	-47,3	-51,8	8,69	-8,15	-6,43	21,1	-5,62	-15,4	63,51
N_z , Н/мм ²	-259	-255	1,57	-32,5	-9,56	70,58	-	-	-
M_x , (кН*м)/м.п.	-	-	-	-	-	-	-107	-41,4	61,31
M_y , (кН*м)/м.п.	-	-	-	-	-	-	-181	-145	24,83
M_{xy} , (кН*м)/м.п.	-	-	-	-	-	-	-70,9	-64	9,73

Таблиця 3

Внутрішні зусилля (напруження) у вузлі варіанту 3 (перехресні двотаври)

Внутрішні зусилля, напруження	Сталеве армування		Δ , %	Бетонне осердя		Δ , %	Плита перекриття		Δ , %
	ліній.	нелін.		ліній.	нелін.		ліній.	нелін.	
N_x , Н/мм ²	-64,2	-70	8,29	-5,38	-5,16	4,1	-13,1	-19,7	33,5
N_y , Н/мм ²	-62,8	-66,5	5,56	-8,6	-6,77	21,28	-11,8	-17,7	33,3
N_z , Н/мм ²	-210	-216	2,78	-26,5	-9,69	63,43	-	-	-
M_x , (кН*м)/м.п.	-	-	-	-	-	-	-96,6	-83,7	13,35
M_y , (кН*м)/м.п.	-	-	-	-	-	-	-163	-137	15,95
M_{xy} , (кН*м)/м.п.	-	-	-	-	-	-	55,3	55	0,5

6 ВИСНОВКИ

1) За результатами нелінійних розрахунків для варіанту з труобетонними колонами без додаткового армування отримано перерозподіл внутрішніх зусиль в колонах порівняно з лінійним розрахунком, зокрема збільшення величини напружень в зовнішній сталевій оболонці близько 24.54% та їх зменшення близько 66.34% в бетонному осерді колон, проте, за наявності додаткового сталевого жорсткого армування такого перерозподілу, зокрема, приросту величин напружень в сталевих елементах колон не відбувається. Середня величина перерозподілу згинальних моментів в плитах перекриття склала 29.7%.

2) З аналізу величин напружень в сталевій оболонці і сталевому жорсткому армуванні колон, отриманих з нелінійного розрахунку, підтверджено закономірність до їх зниження зі зростанням величини сталевого жорсткого армування, з величини 326 МПа (для варіанту 1) до 255 МПа (для варіанту 2) і 216 МПа (для варіанту 3).

7 ПОДЯКИ

Автори висловлюють подяку компанії ЛІРА САПР в особі її директора, д.т.н., професора Барабаш М.С. за надане ліцензійне програмне забезпечення.

8 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Автори підтверджують, що не мають жодних фінансових або нефінансових інтересів, які могли б вплинути на об'єктивність та достовірність даного дослідження.

Література

1. Earij, A., Alfano, G., Cashell, K., & Zhou, X. (2017). Nonlinear three-dimensional finite-element modelling of reinforced-concrete beams: Computational challenges and experimental validation. *Engineering Failure Analysis*, 82, 92-115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.08.025>
2. Mykhalevskiy N. A., Vegeera P. I., Blikharskiy Z. Y. (2023). Analysis of the effect of uneven damage of reinforced concrete beam using the FEMAP software package. *Modern construction and architecture*, 6, 54-61. DOI: <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2023-6-54-61>
3. Swoo-Heon Lee, Ali Abolmaali, Kyung-Jae Shin, Hee-Du Lee. (2020). ABAQUS modeling for post-tensioned reinforced concrete beams. *Journal of Building Engineering*, 30, Article 101273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2020.101273>
4. Moreira L. S., Sousa J. B. M., Parente E. (2018). Nonlinear finite element simulation of unbonded prestressed concrete beams, *Engineering Structures*, 170, 167-177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.077>
5. Mikulaj J., Szolomicki J. (2019). Numerical modelling of RC floor slabs. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 586, Article 012031, DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/586/1/012031>
6. Адаменко В.М. Методика експериментальних досліджень деформованого стану монолітного ребристого перекриття силосу. Містобудування та територіальне планування. 2015. Вип.55. С. 9-13.
7. Адаменко В. М. Чисельне моделювання напружено-деформованого стану монолітного ребристого перекриття силосу. *Основи та фундаменти*. 2015. Вип.36. С. 48-56.
8. Азізов Т. Н., Перейрас Р. До розрахунку залізобетонних плит методом скінчених елементів. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2023. Вип.43. С. 85-92. DOI: <https://doi.org/10.31713/budres.v0i43.10>
9. Recalde, B. R. B., Gastal, F. P. S. L., Bessa, V. R. D., & Schwetz, P. F. (2015). Numerical analysis of waffle slabs in flexure considering the effects of concrete cracking. *Revista IBRACON De Estruturas E Materiais*, 8(2), 225-247. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952015000200009>
10. Li Z, Ding F, Cheng S. (2021). Numerical investigation on moment redistribution of continuous reinforced concrete beams under local fire conditions. *Advances in Structural Engineering*, 24(15), 3375-3388. DOI: <https://doi.org/10.1177/136943322111026226>
11. Wang Y. C. (2000). An analysis of the global structural behaviour of the Cardington steel-framed building during the two BRE fire tests. *Engineering Structures*, 22(5), 401-412. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(98\)00127-8](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(98)00127-8)
12. Gillie M., Usmani A. S., Rotter J. M. (2002). A structural analysis of the Cardington British steel corner test. *Journal of Constructional Steel Research*, 58(4), 427-442. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(01\)00066-9](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(01)00066-9)
13. Jiang, L., Orabi, M. A., Jiang, J., & Usmani, A. (2021). Modelling concrete slabs subjected to fires using nonlinear layered shell elements and concrete damage-plasticity material. *Engineering Structures*, 234, Article 111977. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111977>
14. Qiu J., Jiang L. (2023). An integrated section model to enable simulating composite slabs in fire simply as modelling a flat slab. *Computers & Structures*, 289, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2023.107180>
15. Адаменко В. Розвиток методів розрахунку і конструювання сталевих будівель і споруд: від Ейфелевої вежі до національного стадіону Сінгапурського спортивного комплексу. Будівельні конструкції. Теорія і практика. 2022. Вип.11. С. 32-43. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.11.2022.32-43>
16. Adamenko V., Mavdiuk A. Дослідження впливу ефектів другого порядку на прикладі сталевих каркасів аеропорту. Містобудування та територіальне планування. 2020. Вип.72. С. 176-186. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2020.72.176-186>
17. Tao, Z., Wang, Z., & Yu, Q. (2013). Finite element modelling of concrete-filled steel stub columns under axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 89, 121-131. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2013.07.001>

18. Ouyang, Y., Kwan, A.K., Lo, S.H., & Ho, J.C. (2017). Finite element analysis of concrete-filled steel tube (CFST) columns with circular sections under eccentric load. *Engineering Structures*, 148, 387-398. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2017.06.064>
19. Nikolić J., Kostić S. M., Stošić S. (2023). Numerical modelling of concrete-filled steel tubular short columns under axial compression. *Building Materials and Structures*, 66, 2300004N. DOI: <https://doi.org/10.5937/GRMK2300004N>
20. Sarir, P., Jiang, H., Asteris, P.G., Formisano, A. & Armaghani, D.J. (2022). Iterative Finite Element Analysis of Concrete-Filled Steel Tube Columns Subjected to Axial Compression. *Buildings*, 12, 2071. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12122071>
21. Bryde D., Broquetas M., Volm J. M. (2013). The project benefits of Building Information Modelling (BIM). *International Journal of Project Management*, 31(7), 971-980. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.12.001>
22. Volk, R., Stengel, J. & Schultmann, F. (2014). Building Information Models (BIM) for existing buildings – literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38, pp.109-127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>
23. Ghaffarianhoseini A., Tookey J., Ghaffarianhoseini A., Naismith N., Azhar S., Efimova O. & Raahemifar K. (2017). Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1046-1053. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.083>
24. Адаменко В., Романишен О. Реалізація принципів будівельного інформаційного моделювання (BIM) та інформаційних технологій розрахунку при проектуванні залізобетонних і сталезалізобетонних каркасних будівель. Будівельні конструкції. Теорія і практика. 2023. Вип.13. С. 51–61. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.13.2023.51-61>
25. Адаменко В. Досвід впровадження BIM-технологій в навчальний процес на кафедрі металевих і дерев'яних конструкцій КНУБА. Будівельні конструкції. Теорія і практика. 2022. Вип.10. С. 66–78. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.10.2022.66-78>
26. Visintini, D., Marcon, E., Pantó, G., Canevese, E.P., Gottardo, T.D., & Bertani, I. (2019). Advanced 3d modeling versus building information modeling: the case study of Palazzo Ettoreo in Sacile (Italy). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-1137-2019>
27. Hui W., Xu H., Li Z. & Ma C. (2019). Parametric Design and Application of Assembled Steel Plate Composite Beam Bridge Based on BIM Technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 371(2), 022074. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/371/2/022074>
28. Tang J., Lu W., Fu D., Geng L., Luo W. (2022). Study on new joint connection scheme of steel reinforced concrete composite structure. *International Conference on Electronic Information Engineering, Big Data, and Computer Technology (EIBDCT 2022)*, 122563A. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2636776>
29. Eleftheriadis, S., Duffour, P., Stephenson, B., & Mumovic, D. (2018). Automated specification of steel reinforcement to support the optimisation of RC floors. *Automation in Construction*, 96, 366–377. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.005>
30. Mangal M., Cheng J. C. P. (2018). Automated optimization of steel reinforcement in RC building frames using building information modeling and hybrid genetic algorithm. *Automation in Construction*, 90, 39-57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.01.013>

References

1. Earij, A. Alfano, G., Cashell, K., & Zhou, X. (2017). Nonlinear three-dimensional finite-element modelling of reinforced-concrete beams: Computational challenges and experimental validation. *Engineering Failure Analysis*, 82, 92-115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.08.025>
2. Mykhalevskiy N. A., Vegera P. I., Blikharskyi Z. Y. (2023). Analysis of the effect of uneven damage of reinforced concrete beam using the FEMAP software package. *Modern construction and architecture*, 6, 54-61. DOI: <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2023-6-54-61>
3. Swoo-Heon Lee, Ali Abolmaali, Kyung-Jae Shin, Hee-Du Lee. (2020). ABAQUS modeling for post-tensioned reinforced concrete beams. *Journal of Building Engineering*, 30, Article 101273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101273>

4. Moreira L. S., Sousa J. B. M., Parente E. (2018). Nonlinear finite element simulation of unbonded prestressed concrete beams, *Engineering Structures*, 170, 167-177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.077>
5. Mikula J., Szolomicki J. (2019). Numerical modelling of RC floor slabs. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 586, Article 012031, DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/586/1/012031>
6. Adamenko V. M. (2015). Metodyka eksperymentalnykh doslidzhen deformovanoho stanu monolitnoho rebrystoho perekryttia sylosu. [Methodology of experimental studies of the deformed state of the monolithic ribbed slabs of the silo]. *Urban development and spatial planning*, 55, 9-13. [in Ukrainian].
7. Adamenko V. M. (2015). Chyselne modeliuvannia napruzhenno-deformovanoho stanu monolitnoho rebrystoho perekryttia sylosu. [Numerical modeling of the stress-strain state of the monolithic ribbed slabs of the silo]. *Bases and Foundations*, 36, 48-56. [in Ukrainian].
8. Azizov T. N., Pereiras R. (2023). Do rozrakhunku zalizobetonnykh plyt metodom skinchenykh elementiv. [For the calculation of reinforced concrete slabs using the finite element method]. *Resource-saving materials, structures, buildings and structures*, 43, 85-92. DOI: <https://doi.org/10.31713/budres.v0i43.10> [in Ukrainian].
9. Recalde, B. R. B., Gastal, F. P. S. L., Bessa, V. R. D., & Schwetz, P. F. (2015). Numerical analysis of waffle slabs in flexure considering the effects of concrete cracking. *Revista IBRACON De Estruturas E Materiais*, 8(2), 225–247. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952015000200009>
10. Li Z, Ding F, Cheng S. (2021). Numerical investigation on moment redistribution of continuous reinforced concrete beams under local fire conditions. *Advances in Structural Engineering*, 24(15), 3375-3388. DOI: <https://doi.org/10.1177/13694332211026226>
11. Wang Y. C. (2000). An analysis of the global structural behaviour of the Cardington steel-framed building during the two BRE fire tests. *Engineering Structures*, 22(5), 401-412. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(98\)00127-8](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(98)00127-8)
12. Gillie M., Usmani A. S., Rotter J. M. (2002). A structural analysis of the Cardington British steel corner test. *Journal of Constructional Steel Research*, 58(4), 427-442. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(01\)00066-9](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(01)00066-9)
13. Jiang, L., Orabi, M. A., Jiang, J., & Usmani, A. (2021). Modelling concrete slabs subjected to fires using nonlinear layered shell elements and concrete damage-plasticity material. *Engineering Structures*, 234, Article 111977. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111977>, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111977>
14. Qiu J., Jiang L. (2023). An integrated section model to enable simulating composite slabs in fire simply as modelling a flat slab. *Computers & Structures*, 289, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2023.107180>
15. Adamenko V. (2022). Rozvytok metodiv rozrakhunku i konstruiuvannia stalevykh budivel i sporud: vid Eifelevoi vezhi do natsionalnoho stadionu Sinhapurskoho sportyvnoho kompleksu. [Development of calculation and detailing methods of steel buildings: From the Eiffel tower to the National stadium of Singapore sports hub]. *Building constructions. Theory and Practice*, 11, 32–43. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.11.2022.32-43> [in Ukrainian].
16. Adamenko V., Mavdiuk A. (2020). Doslidzhennia vplyvu efektyv drugoho poriadku na prykladi stalevoho karkasu aeroportu. [Study of the influence of second order effects on the example of the steel frame of the airport]. *Urban development and spatial planning*, 72, 176–186. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2020.72.176-186> [in Ukrainian].
17. Tao, Z., Wang, Z., & Yu, Q. (2013). Finite element modelling of concrete-filled steel stub columns under axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 89, 121-131. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2013.07.001>
18. Ouyang, Y., Kwan, A.K., Lo, S.H., & Ho, J.C. (2017). Finite element analysis of concrete-filled steel tube (CFST) columns with circular sections under eccentric load. *Engineering Structures*, 148, 387-398. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2017.06.064>
19. Nikolić J., Kostić S. M., Stošić S. (2023). Numerical modelling of concrete-filled steel tubular short columns under axial compression. *Building Materials and Structures*, 66, 2300004N. DOI: <https://doi.org/10.5937/GRMK2300004N>

20. Sarir, P., Jiang, H., Asteris, P.G., Formisano, A. & Armaghani, D.J. (2022). Iterative Finite Element Analysis of Concrete-Filled Steel Tube Columns Subjected to Axial Compression. *Buildings*, 12, 2071. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12122071>
21. Bryde D., Broquetas M., Volm J. M. (2013). The project benefits of Building Information Modelling (BIM). *International Journal of Project Management*, 31(7), 971-980. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.12.001>
22. Volk, R., Stengel, J. & Schultmann, F. (2014). Building Information Models (BIM) for existing buildings – literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38, pp.109-127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>
23. Ghaffarianhoseini A., Tookey J., Ghaffarianhoseini A., Naismith N., Azhar S., Efimova O. & Raahemifar K. (2017). Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1046-1053. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.083>
24. Adamenko V., Romanyshen O. (2023). Realizatsiia pryntsyviv budivelnoho informatsiinoho modeliuвання (BIM) ta informatsiinykh tekhnolohii rozrakhunku pry proiektuvanni zalizobetonnykh i stalezalizobetonnykh karkasnykh budivel. [Implementation of building information modeling (BIM) principles and information technologies for structural analysis in the design of reinforced concrete and composite steel-reinforced concrete framed buildings]. *Building constructions. Theory and Practice*, 13, 51–61. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.13.2023.51-61> [in Ukrainian].
25. Adamenko V. (2022). Dosvid vprovadzhenia BIM-tekhnolohii v navchalnyi protses na kafedri metalevykh i derevianykh konstruksii KNUBA. [Experience of implementing BIM technologies in the educational process at the department of steel and timber structures of KNUCA]. *Building constructions. Theory and Practice*, 10, 66–78. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.10.2022.66-78> [in Ukrainian].
26. Visintini, D., Marcon, E., Pantó, G., Canevese, E.P., Gottardo, T.D., & Bertani, I. (2019). Advanced 3d modeling versus building information modeling: the case study of Palazzo Ettoreo in Sacile (Italy). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-1137-2019>
27. Hui W., Xu H., Li Z. & Ma C. (2019). Parametric Design and Application of Assembled Steel Plate Composite Beam Bridge Based on BIM Technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 371(2), 022074. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/371/2/022074>
28. Tang J., Lu W., Fu D., Geng L., Luo W. (2022). Study on new joint connection scheme of steel reinforced concrete composite structure. *International Conference on Electronic Information Engineering, Big Data, and Computer Technology (EIBDCT 2022)*, 122563A. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2636776>
29. Eleftheriadis, S., Duffour, P., Stephenson, B., & Mumovic, D. (2018). Automated specification of steel reinforcement to support the optimisation of RC floors. *Automation in Construction*, 96, 366–377. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.005>
30. Mangal M., Cheng J. C. P. (2018). Automated optimization of steel reinforcement in RC building frames using building information modeling and hybrid genetic algorithm. *Automation in Construction*, 90, 39-57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.01.013>

Адаменко Вячеслав Миколайович

Київський національний університет будівництва та архітектури,
к.т.н., доцент
пр. Повітрофлотський, 31, м. Київ, 03037, Україна
vchsvet@gmail.com

ORCID: 0000-0002-7469-9585

Дзюбка Дмитро Андрійович

магістр
dziubkodmytro@gmail.com

ORCID: 0009-0000-4003-6161

Романишен Олег Віталійович

Київський національний університет будівництва та архітектури,
магістр
пр. Повітрофлотський, 31, м. Київ, 03037, Україна

olegromanyshen@gmail.com
ORCID: 0009-0001-0925-8329

Для посилань:

Адаменко В. М., Дзюбко Д. А., Романишен О. В. Дослідження напружено-деформованого стану вузлів сталезалізобетонних каркасно-монолітних будівель за допомогою інформаційних технологій розрахунку та будівельного інформаційного моделювання. Механіка та математичні методи, 2024. Т. VI. № 1. С. 107–123.

For references:

V. Adamenko, D. Dziubko, O. Romanyshen. (2024). Stress-strain state investigation of nodes of composite steel-reinforced concrete frame-monolithic buildings using information technology for structural analysis and building information modeling. Mechanics and Mathematical Methods. VI (1). 107–123.

UDK 624.04

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF DAMAGED BEAMS REINFORCED WITH FIBER CONCRETE

D. Kirichenko¹, V. Yesvandzhyia¹

¹ *Odessa State Academy of Construction and Architecture*

Abstract. The results of the study of damaged reinforced concrete beams of rectangular cross-section reinforced with fiber concrete are considered. Previously, experimental studies of beams damaged in the stretched or compressed zone, reinforced with steel-reinforced concrete, were carried out. First, the theoretical value of the load-bearing capacity of a reinforced concrete beam without damage was determined using various existing methods, and then its load-bearing capacity was determined experimentally. Based on the results, graphs of the change in deflections under the increasing load, graphs of the dependence of the relative longitudinal deformation on the load for the left and right support parts of the beam, as well as for the zone of its net bending, were constructed for each sample. At the next stage of research, the bearing capacity of two groups of reinforced beams was determined. The first group consisted of three samples with compression zone damage; the second group had two samples with damage in the stretched zone. In addition to the bearing capacity, deflections and relative longitudinal deformations are determined for each sample.

Modeling and calculations were performed for five samples of reinforced beams with variation of the damage zone and its volume. In all calculations, the load was considered in the form of two concentrated forces applied symmetrically. Computer modeling and numerical analysis of damaged beams using the finite element method were performed in two computer programs — Robot Structural Analysis and LIRA-SAPR. The maximum deflections and stresses are determined.

A comparative analysis of the obtained results with the results of experimental studies was carried out. It was established that the deflections obtained as a result of calculations in the two programs are practically the same. And the tensions are somewhat different. The maximum difference in stresses is observed for the ZBP1 sample — 11.8%. For four other samples, it is approximately the same, and on average it is 5.8%. Comparing the results of calculating the maximum stresses in LIRA-SAPR with the results of experimental studies gives a maximum discrepancy of 5.85%. And the biggest discrepancy occurs in the deflections — here it fluctuates in the range of 19.0÷19.2%.

Keywords: damaged beam, reinforced concrete, experiment, finite element method, LIRA-SAPR, Robot.

СКІНЧЕНО-ЕЛЕМЕНТНИЙ АНАЛІЗ ПОШКОДЖЕНИХ БАЛОК, ПІДСИЛЕНИХ ФІБРОБЕТОНОМ

Кіриченко Д. О.¹, Єсванджия В. Ю.¹

¹ *Одеська державна академія будівництва та архітектури*

Анотація. Розглядаються результати дослідження пошкоджених залізобетонних балок прямокутного поперечного перерізу, підсилених фібробетоном. Попередньо були проведені експериментальні дослідження балок, пошкоджених у розтягнутій або стиснутій зоні, посиленіх сталеві фібробетоном. Спочатку за різними існуючими методиками було визначено теоретичне значення несучої здатності залізобетонної балки без ушкоджень, а потім її несучу здатність визначили експериментально. За результатами для кожного зразка побудовано графіки зміни прогинів під дією навантаження, що зростає, графіки залежності відносної

поздовжньої деформації від навантаження для лівої та правої опорних частин балки, а також для зони її чистого згину. На наступному етапі досліджень було визначено несучу здатність двох груп посиленних балок. Перша група складалася з трьох зразків, що мали пошкодження стиснутої зони; у другій групі було два зразки з пошкодженнями у розтягнутій зоні. Окрім несучої здатності, для кожного зразка визначені прогини та відносні поздовжні деформації.

Моделювання та розрахунки виконувалися для п'яти зразків посиленних балок з варіацією зони пошкодження та її об'ємом. В усіх розрахунках розглядалося навантаження у вигляді двох зосереджених сил, що прикладені симетрично. Виконане комп'ютерне моделювання і чисельний аналіз пошкоджених балок методом скінчених елементів у двох комп'ютерних програмах — Robot Structural Analysis і LIRA-SAPR. Визначені максимальні прогини та напруження.

Здійснений порівняльний аналіз отриманих результатів з результатами експериментальних досліджень. Встановлено, що прогини, отримані в результаті розрахунків у двох програмах практично однакові. А напруження дещо відрізняються. Максимальна розбіжність у напруженнях спостерігається для зразка RCD1 — 11,8 %. Для чотирьох інших зразків вона приблизно однакова, і у середньому складає 5,8 %. Порівняння результатів обчислення максимальних напружень у LIRA-SAPR з результатами експериментальних досліджень дає максимальну розбіжність 5,85%. А найбільша розбіжність виникає у прогинах — тут вона коливається в інтервалі 19,0÷19,2 %.

Ключові слова: пошкоджена балка, сталеві фібробетон, експеримент, метод скінчених елементів, LIRA-SAPR, Robot.

1 INTRODUCTION

The field of application of reinforced concrete beams in construction is very large. They are used in various constructions and structures, such as high-rise residential and industrial buildings, airports, bridges, for laying railway and tram lines, etc.

Due to various reasons, these structures can be damaged. It can be both mechanical damage associated with the destruction of concrete and corrosion of fittings, and damage as a result of long-term operation. This problem is especially relevant in our time, since a large amount of damage occurs as a result of military operations. It is not always advisable to change the structure, in most cases it is more economical to strengthen the damaged part of the structure without its complete replacement. At the scale of the country, such an approach undoubtedly leads to a significant economic effect.

There are different ways of strengthening. The appearance of new materials led to new, more effective such methods. Reinforcement of building structures with composite materials reinforced with carbon, glass and other fibers has gained great popularity. Their indisputable advantages are increased strength, resistance to aggressive environmental influences, etc. But there are also some disadvantages, first of all, technological difficulties and the production of the necessary composites in our conditions. Reinforcement of the damaged area with steel-reinforced concrete is a very promising direction in strengthening damaged structures. Numerous studies prove that steel fiber concrete can improve concrete characteristics such as crack resistance, frost resistance, tensile strength, bending, torsion, etc. The use of fiber allows you to change the nature of the destruction process. Unlike ordinary concrete, in which this process occurs almost instantly, in fiber concrete there is no brittle failure, and the structure continues to resist the load, and the nature of the failure changes from brittle to viscous.

2 LITERATURE ANALYSES AND PROBLEM STATEMENT

Many works are devoted to the strengthening of reinforced concrete beams. All of them can be divided into experimental and theoretical, and the latter include analytical and numerical methods for calculating reinforcements. The theoretical methods of calculation of reinforcements are currently insufficiently developed. This is explained by the complexity of the mathematical model of amplification, regardless of the method used. This fully applies to beams reinforced with fiber concrete. In this regard, preference is given to numerical methods. First of all, the finite element method (FEM), because it is the only universal method, the possibility of which is practically not limited. This explains the use of FEM for numerical analysis in all modern engineering calculation programs. Implementation of the FEM algorithm is carried out using modern computer programs, such as ANSYS [1], ABAQUS [2], NASTRAN [3], etc., designed for numerical modeling and analysis of complex structures, including beams with inclusions.

The article [4] discusses 3D modeling in ANSYS of the destruction of an element of a structural reinforced concrete beam. The authors [5] show the use of the finite element method for modeling damaged reinforced concrete beams. The corresponding numerical analysis was carried out in ABAQUS using the concrete plasticity model. The article [6] considers the critical parameters affecting the efficiency of fiber-reinforced polymer systems with an external lateral connection based on the finite-element model developed by the authors. An interesting work is presented by the authors of the article [7], where a multifactorial numerical experiment was conducted using computer modeling in the ANSYS program.

Articles [8-10] are devoted to a similar problem. In [8], experimental data from four-point bending of six reinforced concrete beams and the results of finite-element modeling obtained using ANSYS are considered. [9] suggests using discrete fiber reinforcement for tunnel finishing. The task is also modeled in ANSYS. The same authors in [10] investigate the ability of fibers to control cracks by summarizing the results of more than ninety tensile tests of reinforced concrete prisms, conducted with different sizes, reinforcement ratios, number of fibers, and concrete strength. Recent finite element models for predicting crack spacing in fiber reinforced concrete composites are evaluated and critically discussed.

3 PURPOSE AND OBJECTIVES OF THE STUDY

The purpose of the work is the numerical analysis of damaged beams reinforced with fiber concrete and the subsequent comparison of the results with the data of experimental studies.

To achieve this goal, it was necessary to perform computer modeling and numerical analysis of damaged beams using the finite element method in two computer programs and to perform a comparative analysis of the obtained results with the results of experimental studies.

4 MATERIALS AND METHODS OF RESEARCH

For computer modeling of damaged beams and determination of their stress-strain state after strengthening, two software packages were used in the work — Robot Structural Analysis [11] and LIRA-SAPR [12].

5 RESEARCH RESULTS

Modeling and calculations were performed for five samples of reinforced beams with variation of the damage zone and its volume. In all calculations, the load was considered in the form of two concentrated forces, the value of $F = 40.3$ kN each, which corresponds to the average bearing capacity of undamaged beams. The forces are applied at a distance of 60 cm from the edge of the beam; the supports are located 5 cm from the edge. Thus, the net bending zone was 80 cm.

The elastic constants that were specified for the calculations were obtained after processing by the methods of mathematical statistics of primary indicators based on the results of tests of prisms and cubes: for fiber concrete: initial modulus of elasticity — $E = 3.6 \cdot 10^4$ MPa; Poisson's ratio — $\mu = 0.22$; for concrete: initial modulus of elasticity — $E = 2.6 \cdot 10^4$ MPa; Poisson's ratio is $\mu = 0.2$.

When modeling in Robot Structural Analysis, two types of finite elements were used — triangular elements with three nodes ($T3$), rectangular elements with four nodes ($Q4$). The size of the element was set to 2x2 cm, the grid was broken automatically. The results of calculations in Robot Structural Analysis are summarized in the Table 1.

In Fig. 1 shows the geometric model of the RCD3 beam sample, in which the compressed zone was damaged and then reinforced with fiber concrete. In Fig. 2, 3 show diagrams of deflections and stresses.

Table 1

Calculation results in Robot Structural Analysis Professional

Sample	Maximum deflection, mm	Maximum stress, MPa	
		XX	YY
RCD1	4,07	37,66	20,12
RCD2	4,08	35,26	18,28
RCD3	4,04	35,27	18,28
RCD4	4,05	35,30	17,98
RCD5	3,96	35,20	17,98

Sample RCD3

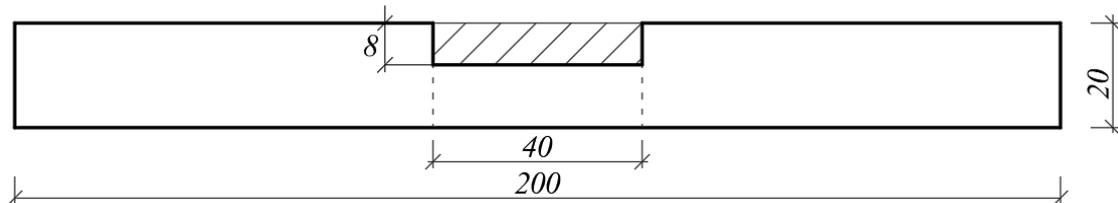


Fig. 1. Geometric model of RCD3 sample

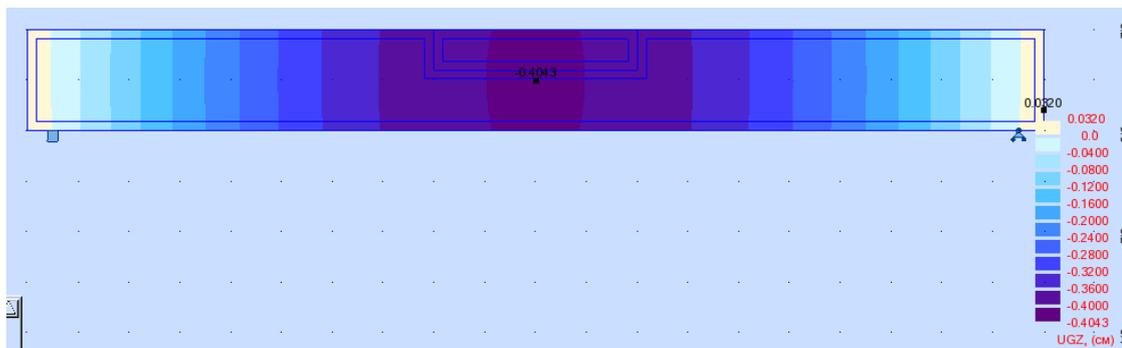


Fig. 2. Deflections of sample RCD3

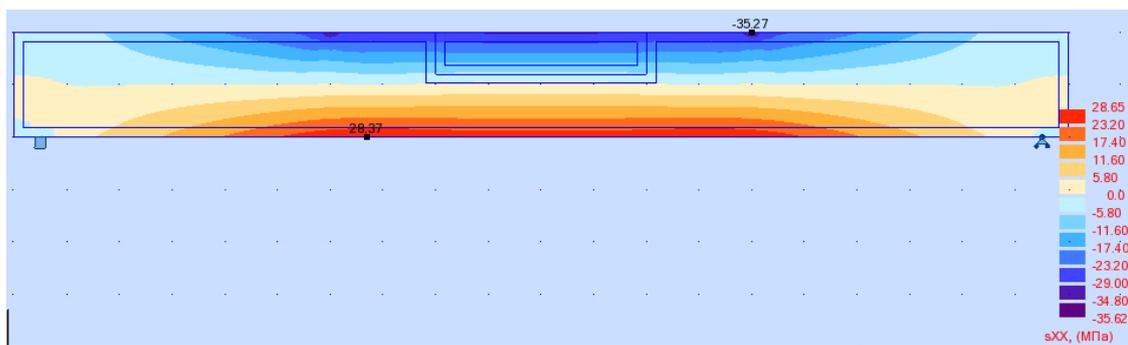


Fig. 3. Stress XX in sample RCD3

In Fig. 4 shows the geometric model of the RCD5 beam sample, in which the stretched zone was damaged and then reinforced with fiber concrete. In Fig. 5, 6 show graphs of stresses and deflections.

Sample RCD5

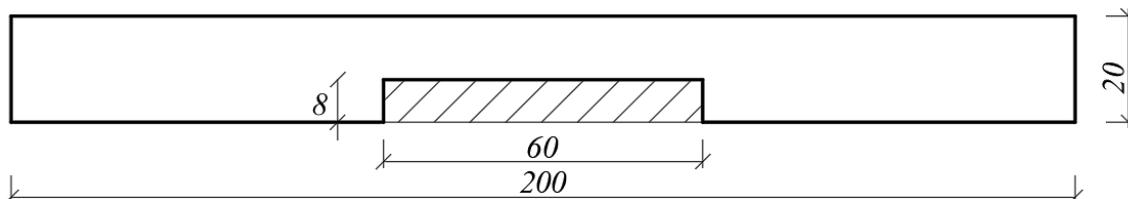


Fig. 4. Geometric model of RCD5 sample

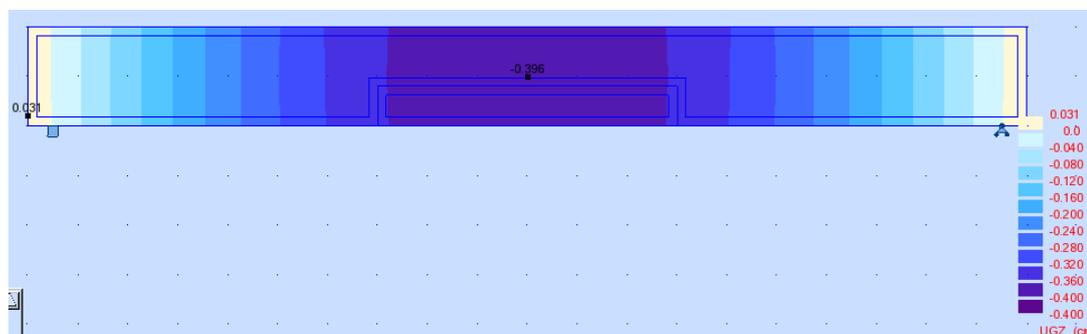


Fig. 5. Deflections of sample RCD5

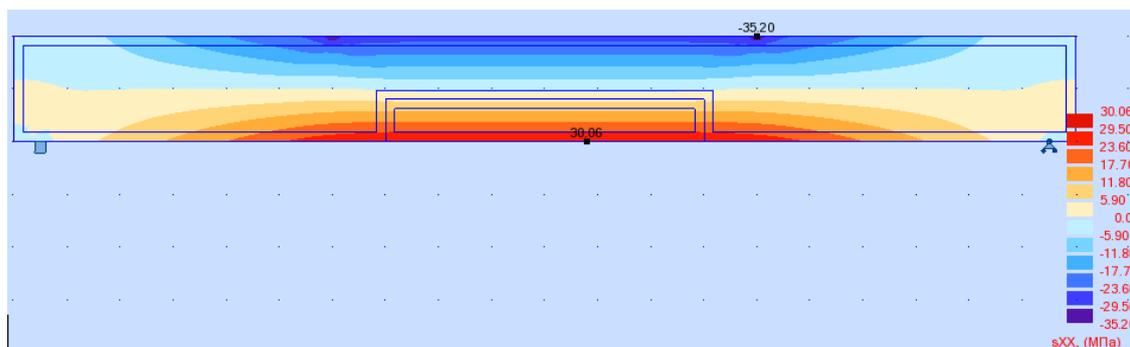


Fig. 6. Stress XX in sample RCD5

Other results of simulation and calculation of damaged beams in the Robot Structural Analysis Professional program look similar.

When calculating the reinforced concrete beam and the fiber concrete element located in it, LIRA-SAPR used finite element types No. 44, No. 42 — plates. A linear type of calculation was used.

The results of the calculations are summarized in the Table 2.

Table 2

Results of calculations in LIRA-SAPR

Sample	Maximum deflection, mm	Maximum stress, MPa	
		XX	YY
RCD1	4,09	33,22	32,87
RCD2	4,06	33,22	23,64
RCD3	4,03	33,22	23,65
RCD4	4,03	33,23	23,81
RCD5	3,94	33,12	24,40

In Fig. 7, 8 show curves of deflections and stresses of sample RCD3.

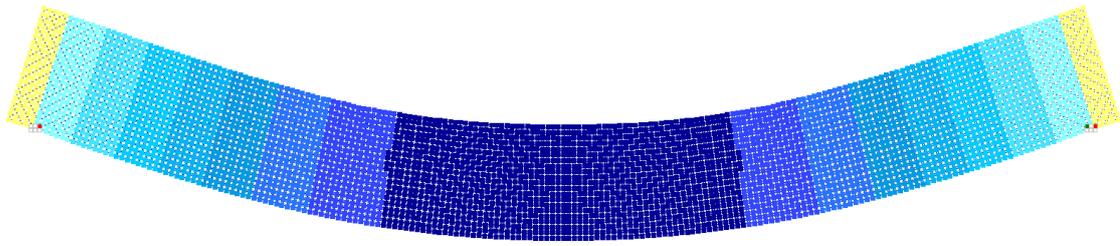


Fig. 7. Deflections of sample RCD3

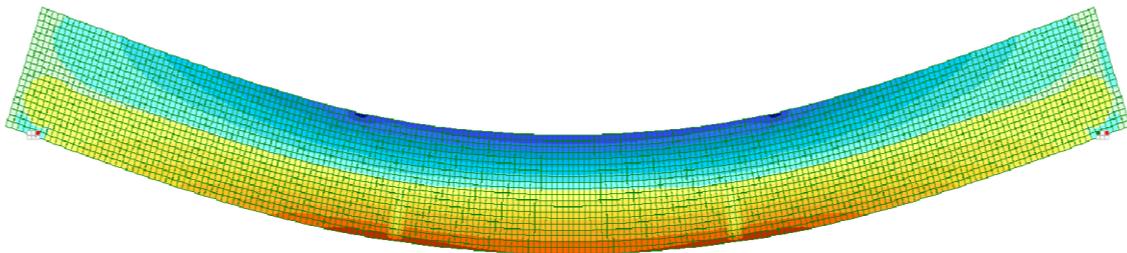


Fig. 8. Stress XX in sample RCD3

In Fig. 9, 10 show curves of deflections and stresses of sample RCD5.

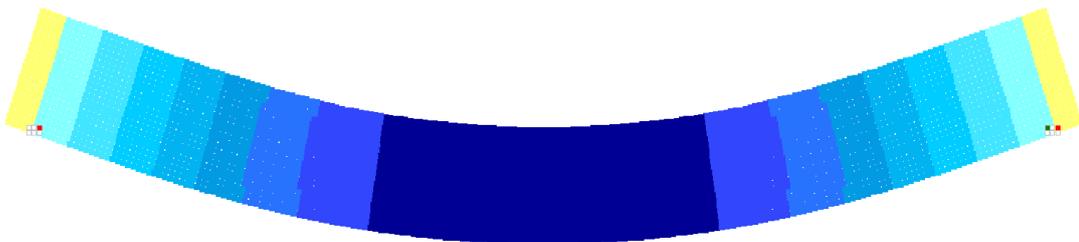


Fig. 9. Deflections of sample RCD5

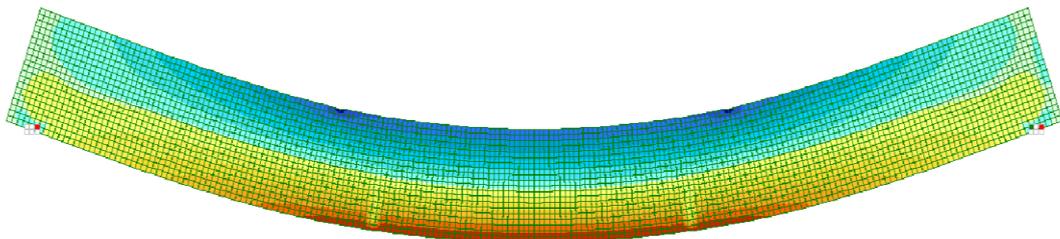


Fig. 10. Stress XX in sample RCD5

Other results of simulation and calculation of damaged beams in the LIRA-SAPR program look similar.

6 DISCUSSION OF RESEARCH FINDINGS

Previously, experimental studies of beams damaged in the stretched or compressed zone, reinforced with steel-reinforced concrete, were carried out. First, the theoretical value of the load-bearing capacity of a reinforced concrete beam without damage was determined using various existing methods, and then its load-bearing capacity was determined experimentally. Based on the results, graphs of the change in deflections under the increasing load, graphs of the dependence of the relative longitudinal deformation on the load for the left and right support parts of the beam, as well as for the zone of its net bending, were constructed for each sample.

At the next stage of research, the bearing capacity of two groups of reinforced beams was determined. The first group consisted of three samples (RCD1, RCD2, RCD3) that had damage to the compressed zone; the second group had two samples with damage in the stretched zone (RCD4, RCD5). In addition to the bearing capacity, deflections and relative longitudinal deformations are determined for each sample.

In the Table 3 shows the maximum deflections and stresses obtained from the results of experimental studies and finite element analysis in two programs.

Table 3

Comparison of experimental results and computer analysis

Sample	Maximum deflection, mm			Maximum stress, <i>MPa</i>		
	LIRA-SAPR	Robot	Experiment	LIRA-SAPR	Robot	Experiment
RCD1	4,09	4,07	4,97	33,22	37,66	33,71
RCD2	4,06	4,08	4,98	33,22	35,26	32,18
RCD3	4,03	4,04	4,84	33,22	35,27	31,62
RCD4	4,03	4,05	4,95	33,23	35,30	31,28
RCD5	3,94	3,96	4,76	33,12	35,20	31,76

7 CONCLUSIONS

Thus, computer modeling and finite element calculations of five samples of reinforced beams were carried out in two programs — LIRA-SAPR and Robot Structural Analysis. Obtained values of stresses and deflections. It was established that the deflections obtained as a result of calculations in the two programs are practically the same. And the tensions are somewhat different. The maximum difference in stresses is observed for sample RCD1 — 11.8%. For four other samples, it is approximately the same, and on average it is 5.8%. Comparing the results of calculating the maximum stresses in LIRA-SAPR with the results of experimental studies gives a maximum discrepancy of 5.85% (Sample RCD4). And the biggest discrepancy occurs in the deflections — here it fluctuates in the range of 19.0÷19.2%.

8 ETHICAL DECLARATIONS

The authors have no relevant financial or non-financial interests to report.

References

1. Lazareva D.V., Soroka M.M., Shilyaev O.S. Use the ANSYS PC to solve mechanical problems. Edited by M.G. Surianinov: monograph / D.V. Lazareva, M.M. Soroka, O.S. Shilyaev. Odessa: ODABA, 2020. 432 p. [in Ukrainian]
2. Sidorov V. N., Vershinin V. V. Finite element method in the calculation of structures. Theory, algorithm, examples of calculations in the SIMULIA Abaqus software package: tutorial. M.: ASV Publishing House, 2015, 288 p. [in Ukrainian]
3. Rychkov S.P. Modeling of structures in the Femap with NX Nastran environment. M.: DMK Press, 2013. 784 p. [in Ukrainian]
4. Tjitradi, Darmansyah & Eliatun, Eliatun & Taufik, Syahril. (2017). 3D ANSYS Numerical Modeling of Reinforced Concrete Beam Behavior under Different Collapsed Mechanisms. 7. 14-23. 10.5923/j.mechanics.20170701.02
5. Pazdan, M. (2021). FEM modelling of the static behavior of reinforced concrete beams considering the nonlinear behavior of the concrete. *Studia Geotechnica et Mechanica*,43(3) 206-223. <https://doi.org/10.2478/sgem-2021-0012>
6. Hawileh, Rami & Musto, H.A. & Abdalla, Jamal & Naser, M.Z. (2019). Finite element modeling of reinforced concrete beams externally strengthened in flexure with side-bonded FRP laminates. *Composites Part B: Engineering*. 173. 106952. 10.1016/j.compositesb.2019.106952
7. Radaikin O.V., & Sharafutdinov L.A. (2017). To assess the strength, rigidity and crack resistance of bending reinforced concrete elements reinforced with steel fiber concrete “Shirt”, based on computer modeling in the ANSYS PC. *News of KGASU*, (1 (39)), 111-120. [in Ukrainian].
8. Vasudevan G., Kothandaraman S., Azhagarsamyb S. Study on non-linear flexural behavior of reinforced concrete beams using ANSYS by discrete reinforcement modeling // *Strenght of materials*. Puducherry. 2013. P. 149–162.
9. Tiberti G., Minelli F., Plizzari G. Reinforcement optimization of fiber reinforced concrete linings for conventional tunnels // *Composites*. 2014. P. 199–207.
10. Tiberti G., Minelli F., Plizzari G. Cracking behavior in reinforced concrete members with steel fibers: A comprehensive experimental study. // *Cement and concrete research*. 2015. P. 24–34.
11. Sukhorukov V.V. Autodesk Robot Structural Analysis Professional. Design and computing complex: reference and training manual. DIA, 2009. 128 p. [in Ukrainian]
12. D.A. Gorodetsky, M.S. Barabash, R.Yu. Vodopyanov and others. Software complex LIRA-SAPR. 2015. Study guide. Ed. Academician of RAASN A.S. Gorodetsky. M.: Electronic publication, 2015. 376 p. [in Ukrainian]

Література

1. Лазарева Д.В., Сорока М.М., Шилияєв О.С. Прийоми роботи з ПК ANSYS при розв’язанні задач механіки. Під редакцією М.Г. Сур’янінова: монографія / Д.В. Лазарева, М.М. Сорока, О.С. Шилияєв. Одеса: ОДАБА, 2020. 432 с.
2. Сидоров В.Н., Вершинін В.В. Метод скінчених елементів у розрахунку споруд. Теорія, алгоритм, приклади розрахунків у програмному комплексі SIMULIA Abaqus: навчальний посібник. М: Видавництво АСВ, 2015, 288 с.
3. Ричков З. П. Моделювання конструкцій у середовищі Femap with NX Nastran. М.: ДМК Прес, 2013. 784 с.
4. Tjitradi, Darmansyah & Eliatun, Eliatun & Taufik, Syahril. (2017). 3D ANSYS Numerical Modeling of Reinforced Concrete Beam Behavior under Different Collapsed Mechanisms. 7. 14-23. 10.5923/j.mechanics.20170701.02
5. Pazdan, M. (2021). FEM modelling of the static behaviour of reinforced concrete beams considering the nonlinear behaviour of the concrete. *Studia Geotechnica et Mechanica*,43(3) 206-223. <https://doi.org/10.2478/sgem-2021-0012>

6. Nawileh, Rami & Musto, H.A. & Abdalla, Jamal & Naser, M.Z. (2019). Finite element modeling of reinforced concrete beams externally strengthened in flexure with side-bonded FRP laminates. *Composites Part B: Engineering*. 173. 106952. 10.1016/j.compositesb.2019.106952
7. Радайкін О.В., & Шарафутдінов Л.А. (2017). До оцінки міцності, жорсткості і тріщиностійкості залізобетонних елементів, що згинаються, посилені сталеві фібробетонною «Сорочкою», на основі комп'ютерного моделювання в ПК «ANSYS». *Вісті КГАСУ*, (1(39)), 111-120.
8. Vasudevan G., Kothandaraman S., Azhagarsamy S. Study on non-linear flexural behavior of reinforced concrete beams using ANSYS by discrete reinforcement modeling // *Strenght of materials*. Puducherry. 2013. P. 149–162.
9. Tiberti G., Minelli F., Plizzari G. Reinforcement optimization of fiber reinforced concrete linings for conventional tunnels // *Composites*. 2014. P. 199–207.
10. Tiberti G., Minelli F., Plizzari G. Cracking behavior in reinforced concrete members with steel fibers: A comprehensive experimental study. // *Cement and concrete research*. 2015. P. 24–34.
11. Сухоруков В. В. Autodesk Robot Structural Analysis Professional. Проектно-обчислювальний комплекс: довідково-навчальний посібник. АСВ, 2009. 128 с.
12. Д.А. Городецький, М.С. Барабаш, Р.Ю. Водоп'янов та ін. Програмний комплекс ЛПА-САПР. 2015. Навчальний посібник. За ред. академіка РААСН О.С. Городецького. М: Електронне видання, 2015. 376 с.

Daria Kirichenko

Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture,
Ph.D., Associate Professor
Didrihsona str., 4, Odesa, Ukraine, 65029
dkirichenko@odaba.edu.ua
ORCID: 0000-0002-8484-0925

Vakhtanh Yesvandzhyia

Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture,
Ph.D., Associate Professor
Didrihsona str., 4, Odesa, Ukraine, 65029
vakhtanhyes22@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1151-3560

For references:

D. Kirichenko, V. Yesvandzhyia. (2024). Finite element analysis of damaged beams reinforced with fiber concrete. *Mechanics and Mathematical Methods*. VI (1). 124–133.

Для посилань:

Кіріченко Д. О., Єсванджия В. Ю. Скінчено-елементний аналіз пошкоджених балок, підсилених фібробетоном. *Механіка та математичні методи*, 2024. Т. VI. № 1. С. 124–133.

UDC 539.3:624.046.3

NUMERICAL STUDY OF THE INFLUENCE OF THE LENGTH OF A ROD ON ITS CRITICAL FORCES

S. Bekshaev¹

¹*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*

Abstract: The effect of changing the length of a longitudinally compressed rod on its critical forces is numerically investigated. The research is carried out on the example of a two-span rectilinear rod of bending stiffness constant along length, which is compressed by a constant lengthwise longitudinal force and hinged on one of the ends on an absolutely rigid support, and inside - on a support of finite stiffness. The change in the length of the rod occurs due to the movement of the end hinge support with the corresponding increase or decrease of the adjacent section of the rod without changing the position and characteristics of the remaining constraints. The dependence of the critical forces of the rod on the position of this support and, accordingly, on the length of the adjacent compressed section of the rod is investigated. Calculations are performed on the basis of the use of known exact analytical expressions of the influence functions of a rod of constant cross-section compressed by a longitudinal force constant by length. In the considered examples, qualitative signs of increase, decrease, and extremum of simple critical forces when changing the length of the rod, related to the qualitative features of the corresponding buckling forms, established earlier theoretically, were fully confirmed. In particular, exact calculations have shown that the increase or decrease of the simple critical force when the length of the fragment of the rod adjacent to the movable support is changed is determined by the type of the corresponding buckling form in the neighborhood of this support. Different possible configurations of buckling forms are considered, and the behavior of critical forces when changing the length of the rod are considered for each of the configurations. In order to verify the previously established theoretical results, which relate to the study of the behavior of not only the main critical forces, but also higher simple critical forces, which have an arbitrary number in the spectrum, the calculations are carried out in the article for the second critical forces of the rods considered in the given examples. The results of the calculations are shown in the form of graphs, which represent configurations of buckling forms of various possible types in connection with the corresponding changes in critical forces. Graphs of the dependence of the second critical force of the studied rods on their length are also given. It has been demonstrated that under certain conditions, reducing the length of the rod can lead to a reduction in its critical force.

Keywords: compressed rod, change of critical force, buckling form, effect of length change, qualitative sign.

ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДОВЖИНИ СТРИЖНЯ НА ЙОГО КРИТИЧНІ СИЛИ

Бекшаєв С. Я.¹

¹*Одеська державна академія будівництва та архітектури*

Анотація: Чисельно досліджується вплив зміни довжини поздовжньо стиснутого стрижня на його критичні сили. Дослідження виконується на прикладі двопрогінного прямолінійного стрижня постійної за довжиною згінної жорсткості, який стискається постійною по довжині поздовжньою силою і шарнірно спирається на одному з кінців на абсолютно жорсткому опорі, а всередині – на опорі скінченої жорсткості. Зміна довжини стрижня відбувається за рахунок переміщення кінцевої шарнірної опори з відповідним збільшенням або зменшенням прилеглої ділянки стрижня без зміни положення і характеристик решти закріплень. Досліджується залежність критичних сил стержня від положення цієї опори і, відповідно, від довжини прилеглої стиснутої ділянки стержня. Розрахунки виконуються на основі використання відомих



точних аналітичних виразів функцій впливу стержня постійного поперечного перерізу, стиснутого постійною по довжині поздовжньою силою. У розглянутих окремих прикладах виявлено і цілком підтверджено якісні ознаки зростання, зменшення та екстремума простих критичних сил при зміні довжини стержня, пов'язані з якісними особливостями відповідних форм втрати стійкості, встановлені раніше теоретично. Зокрема, точними розрахунками продемонстровано, що зростання або зменшення простої критичної сили при зміні довжини ділянки стержня, що прилягає до переміщеної опори, визначаються видом відповідної форми втрати стійкості в околі цієї опори. Розглядаються різні можливі конфігурації форм втрати стійкості та поведінка критичних сил при зміні довжини стержня для кожної з конфігурацій. З метою верифікації раніше встановлених теоретичних результатів, які стосуються вивчення поведінки не тільки основних критичних сил, а й вищих простих критичних сил, які мають довільний номер в спектрі, в статті розрахунки проводяться для других критичних сил стержней, розглянутих у наведених прикладах. Результати проведених розрахунків продемонстровані у вигляді графіків, які представляють конфігурації форм втрати стійкості різних можливих типів у зв'язку з відповідними змінами критичних сил. Також наведені графіки залежності другої критичної сили досліджуваних стержней від їх довжини. Продемонстровано, що за певних умов зменшення довжини стержня може привести до зменшення його критичної сили.

Ключові слова: стиснутий стержень, зміна критичної сили, форма втрати стійкості, вплив довжини, якісна ознака.

1 INTRODUCTION

When designing and operating engineering structures containing longitudinally compressed elements, ensuring their stability is of great importance. In this case, as a rule, it is accepted, often without proper verification, that a shorter rod is more stable, i.e. has a higher critical force at which its loss of stability occurs. Although in most cases this assumption is satisfied, the issue of the relationship between the length of a compressed rod and its stability deserves more careful study, since engineering decisions made on its basis can lead to accidents or serious disruptions to the operation of the structure, making its safe operation impossible.

2 LITERATURE ANALYSIS AND PROBLEM STATEMENT

Under standard support conditions, the critical forces of longitudinally compressed rods, as a rule, decrease with increasing their length, i.e. when adding additional compressed sections at the ends of the rod and transferring the end supports to the ends of the formed elongated rod. However, as noted in a number of studies [1 – 3], with some ways of support, in particular in the presence of elastic pinches and/or intermediate elastic supports, reducing the length of the rod can lead to a decrease in critical forces and the risk of loss of stability. In this regard, of great theoretical and practical interest is the question of determining the conditions for the increase or decrease of the critical forces with a change in the length of the rod, as well as of determining the optimal length of the rod at which its critical forces reach its extremal value. This issue was subjected to a fairly detailed theoretical study in the author's work [3], where a straight rod was considered, hinged at one of the ends on an absolutely rigid support, and the change in length occurred due to the moving of this support and the corresponding lengthening or shortening of the adjacent section of the rod. The disadvantage of the work [3] is that, despite a fairly detailed theoretical justification of the results obtained in it, they were not illustrated with specific examples. At the same time, since these results are neither trivial nor obvious, it would be very desirable to provide examples that would confirm their validity.

3 THE PURPOSE AND OBJECTIVES OF THE STUDY

The purpose of the work is to numerically study the behavior of the critical force of a compressed rod when its length changes and to determine the signs of growth, decrease and extremum of the critical force using the example of a two-span rod of constant cross-section along the length, compressed by a constant longitudinal force along the length and supported by an intermediate support of finite rigidity. Note that the results of work [3] were established for a rod with variable bending stiffness along the length without limitations on the number and rigidity of intermediate supports. In addition, since in [3] a change in a critical force arbitrary in number in the spectrum was considered, the present article examines the behavior of the second critical force as a task that is less trivial compared to the case of the main critical force.

4 RESEARCH RESULTS

4.1. Preliminary results. First, we present the main results of the article [3], in which their proof can be found.

We consider a rod hinged at one of its ends on a rigid support and compressed by a longitudinal force constant along its length (at least within a certain area adjacent to this

support). Forms of buckling that correspond to its critical forces (of any number) can be of five types (see Fig. 1).

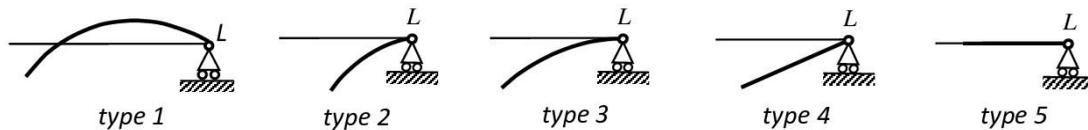


Fig. 1. Different types of buckling forms

The form of the 1st type in the neighborhood of the end support is concave towards the axis of the undeformed rod. In the type 2 form, the convexity faces this axis. Type 3 form has a horizontal tangent at the end support. Forms of the 4th and 5th types in some area adjacent to the end support have straight segments, i.e. are semi-curved. Examples of the implementation of forms of all five types are considered in [1 – 9]. The following six theorems establish qualitative signs of the increase or decrease of critical forces with a change in the length of the rod.

Theorem 1. A simple critical force, which corresponds to the form of the 1st type, decreases as the rod lengthens, provided that the reaction of the support is opposite to the deflections of the rod in the neighborhood of the support.

Theorem 2. The simple critical force corresponding to the type 2 form increases as the rod lengthens.

Theorem 3. Simple critical force, which corresponds to the form of the 3rd type,

a) decreases both when the rod is shortened and when the rod is lengthened, if, with rigid clamping of the end section, its number in the spectrum does not change and it remains simple,

b) increases both with shortening and lengthening of the rod, if this number decreases and it remains simple,

c) increases with shortening and decreases with lengthening of the rod, if it becomes double (i.e., after pinching, it corresponds to two numbers - the same one and one less).

Theorem 4. The simple main critical force when moving the end support reaches a maximum if it corresponds to a type 3 shape.

Theorem 5. The simple critical force, which corresponds to the form of the 4th type (half-curved), increases with elongation and decreases with shortening of the rod.

Theorem 6. The simple critical force, which corresponds to the type 5 form (half-curved), does not change when the rod is lengthened or shortened.

4.2. Numerical verification. We will demonstrate the validity of the established results using the example of a rod with bending rigidity EJ constant along its length, reinforced with an intermediate elastic support (Fig. 3 a).

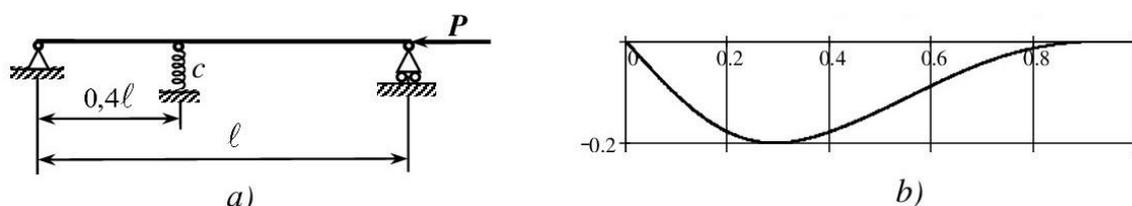


Fig. 2. A rod, the second form of which is the form of the 3rd type when $c = 5,605 \cdot c_0$, $P_2 = 5,120 \cdot P_E$

For this case, explicit expressions for the influence functions of the compressed rod and exact equations of critical forces for standard support conditions are known [10], using which we find that when the support is installed at a distance of $0,4\ell$ from the left support and with its rigidity equal to $c = 5,605 \cdot c_0$, where $c_0 = \pi^3 EJ / \ell^3$, the second critical force is equal to $P_2 = 5,120 \cdot P_E$, where $P_E = \pi^2 EJ / \ell^2$, and it corresponds to the form of the 3rd type (Fig. 3 b). As calculations show, the 2nd critical force of a single-span rod, hinged at one end and rigidly clamped at the opposite end, is equal to $6,047 \cdot P_E$. When introducing an intermediate support, it will become larger. It follows that the rigid clamping of the right end of the rod in Fig. 2 a will make his second critical force first, i.e. we are dealing with case b) of Theorem 3.

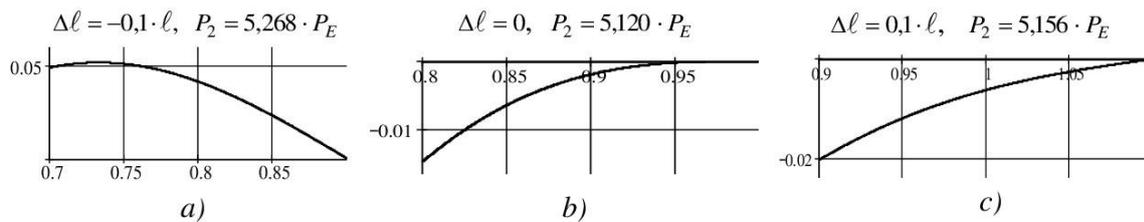


Fig. 3. The end fragment of the 2nd form of the rod shown in Fig. 2 a, when changing its length

Fig. 3 shows the end fragments of the second forms of the original rod, as well as rods shortened and extended by $\Delta\ell = 0,1\ell$ (of types 1 and 2, respectively). Nearby are indicated the corresponding values of the 2nd critical force, exceeding $P_2 = 5,120 \cdot P_E$, in full accordance with Theorem 3.

The elongation of the original rod is accompanied by an increase in the 2nd critical force until it reaches a maximum equal to $P_{2\max} = 5,185 \cdot P_E$, at a length equal to $1,184\ell$. The corresponding forms are shown in Fig. 4.

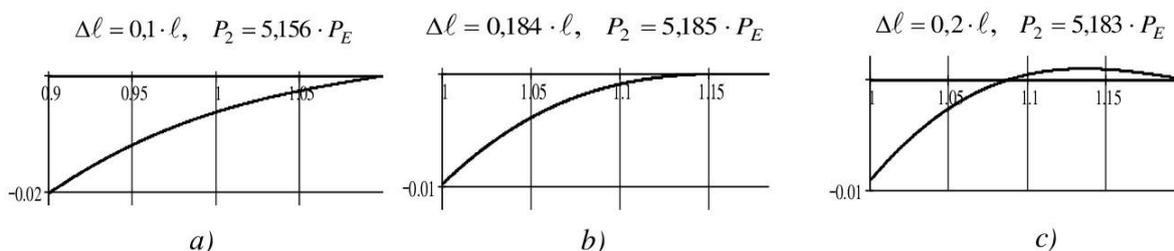


Fig. 4. Perturbations of the second buckling form of the 3rd type of rod shown in Fig. 3 a, with a length equal to $1,184\ell$

Note that now a single-span rod clamped at one end has a second critical force equal to $6,047 \cdot P_E / 1,184^2 = 4,317 \cdot P_E$, so that the considered critical force achieved as a result of installing an intermediate support will be the second in the spectrum and, thus, case a) of Theorem 3 is realized.

Graph of change in P_2 with change in length for the rod in Fig. 3 a is shown in Fig. 5 a, where the elongation of the rod is plotted horizontally in fractions of the original length ℓ , and the ratio P_2/P_E is plotted vertically.

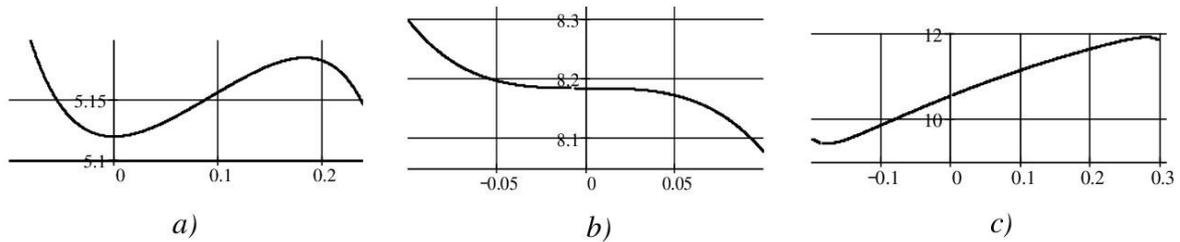


Fig. 5. Graphs of the dependence of the 2nd critical force on the length of the rod. The horizontal line shows the elongation in fractions of the length ℓ of the original rod, the vertical line shows the ratio P_2/P_E

To illustrate case *c*) of Theorem 3, consider a rod rigidly clamped at one end with an elastic support in the middle (Fig. 6 *a*).

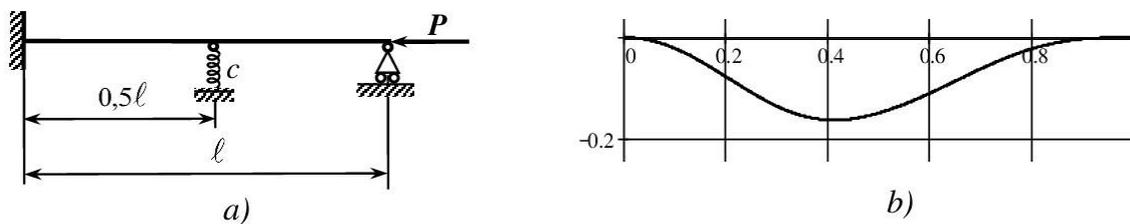


Fig. 6. Rod, the second buckling form of which is the form of the 3rd type when $c = 6,7 \cdot c_0$,
 $P_2 = 8,183 \cdot P_E$.

With a support stiffness coefficient equal to $c = 6,700 \cdot c_0$, the second buckling form has zero slope at the right end (see Fig. 6 *b*) and the clamping makes the corresponding critical force equal to $P_2 = 8,183 \cdot P_E$, double (the intermediate support is in the node of the second buckling form of a single-span rod rigidly clamped at both ends). The results of calculations of the 2nd critical force and the corresponding buckling forms when changing the length are presented in Fig. 7, from which it is clear that both elongation and shortening change the type of form from 3rd to 1st, which in this case, in accordance with Theorem 1, is a sign of a decrease in the critical force with increasing length of the rod.

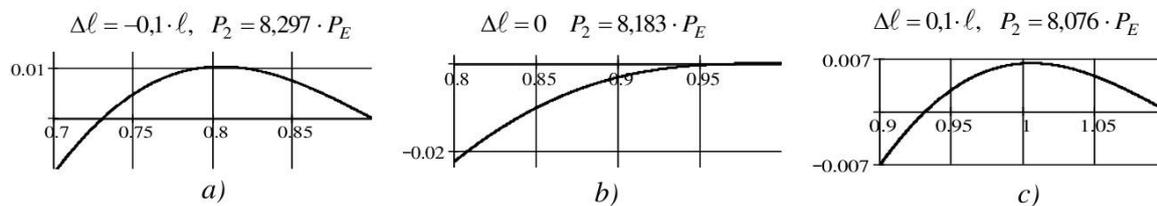


Fig. 7. The end fragment of the 2nd buckling form of the rod shown in Fig. 6 *a*, when its length changes

Fig. 5 *b* shows a graph of the dependence of the 2nd critical force for this case on the length of the rod. As can be seen, the behavior of the critical force completely follows Theorem 3.

The 4th type buckling form is implemented for the rod shown in Fig. 6 a, with a support stiffness coefficient equal to $c = 11,233 \cdot c_0$, and a second critical force equal to $P_2 = 10,530 \cdot P_E$ (Fig. 8 b).

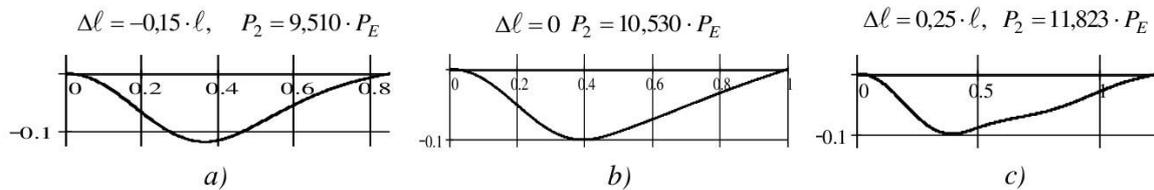


Fig. 8. Perturbations of the 2nd form of the 4th type of rod shown in Fig. 7 a, when its length changes, $c = 11,233 \cdot c_0$

Fig. 8 a and c also show the buckling forms of rods shortened by $\Delta\ell = 0,15 \cdot \ell$ and extended by $\Delta\ell = 0,25 \cdot \ell$, both of the 2nd type, which, according to Theorem 2, is a sign of an increase in the critical force along with the length of the rod, which is confirmed by direct calculation (the corresponding values P_2 are given above the curves). A graph of the dependence of P_2 on the length of the rod for this case is presented in Fig. 5 c.

All calculations and graphs are performed using Mathcad based on exact equations of critical forces, obtained on the basis of exact analytical expressions of the influence functions of a compressed prismatic rod supported by an intermediate elastic support. Forms in Fig. 2 – 8 are normalized so that the reaction of the elastic support is equal to 1. The ordinates of the forms are showed in fractions of the magnitude $1/c_0 = \ell^3 / \pi^3 EJ$.

5 RESEARCH RESULTS DISCUSSION

The results of calculations performed for specific examples presented in the article fully confirm the theoretical conclusions established earlier in the article [3]. Their validity has been established for various combinations of parameters of the considered models, in which different variants of the behavior of critical forces are realized when the length of the rod changes

6 CONCLUSIONS

The work obtained results that allow a deeper and more complete understanding of the behavior of the critical forces of a straight rod, hinged at one of the ends on a rigid support, when the length of the rod changes due to change of the fragment adjacent to this support. It has been established that the behavior (increase or decrease) of simple critical forces when the length of the rod changes is associated with the configuration of the corresponding forms of buckling in the neighborhood of the moving support. The results obtained can be used in the design and operation of engineering structures containing elements subject to longitudinal compression.

7 GRATITUDES

The author thanks the staff of the Structural Mechanics Department of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture for their systematic interest in his research, as well as ideological and technical support, which is an effective impetus for their continuation.

8 ETHICAL DECLARATIONS

The proposed publication does not pursue any material interests and is intended only to expand and deepen knowledge concerning some topical problems of mechanics, and their sharing among specialists in relevant scientific fields.

References

1. Bekshaev S. Ya. (2016). Kachestvennyye metody v zadachah povysheniya ustojchivosti szhatyh sterzhnej [Qualitative methods in problems of increase of stability of compressed bars]. *Visnyk Kyivskoho natsional'noho universytetu tekhnolohiy ta dizaynu. Seriya "Tekhnichni nauki".3* (98). 74 – 82.
2. Bekshaev S. Ya. (2018). Povyshenie ustojchivosti sterzhnya za schet izmeneniya dliny [Increasing the stability of the rod by changing the length]. «World Science», № 6 (34). 2, 12 – 16.
3. Bekshaev S. Ya. (2018). O vlijanii dliny sterzhnya na ego kriticheskie sily [On the influence of the rod length at its critical forces]. Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference «International Trends in Science and Technology». 1. 59 – 64.
4. Bekshaev S. Ya. (2015). Ob optimal'nom raspolozhenii promezhutochnoy opory prodol'no szhatogo sterzhnya [On the optimal location of the intermediate support of longitudinally compressed bar]. *Visnyk Odes'koji derzhavnoji akademiji budivnytva ta arkhitektury*. 60. 400 – 406.
5. Bekshaev S. Ya. (2016). Poluizognutyje formy poteri ustojchivosti i ih ekstremal'nye svojstva [Semi-curved forms of buckling and its extremal properties]. Contemporary problems of natural sciences. Abstr. of 5-th international scientific conference “Tarapov readings – 2016”. Kharkov, Ukraine, March, 1 – 15. 81 – 82.
6. Bekshaev S. Ya. (2016). Poluizognutyje formy poteri ustojchivosti v zadache optimizacii szhatogo trjohproljotnogo sterzhnya [Semi-curved forms of buckling in the problem of optimization of compressed three-span rod]. *Visnyk NTUU “KPI”. Ser. Mashinobuduvannya*. 2 (77). 132 – 139.
7. Bekshaev S. Ya. (2016). Nekotorye voprosy ustoychivosti mnogoproljotnyh sterzhney [Some questions of stability of multi-span continuous rods]. *Visnyk Odes'koji derzhavnoji akademiji budivnytva ta arkhitektury*. 65, 21 – 27.
8. Bekshaev S. Ya. (2019). Ob optimal'nom polozhenii promezhutochnoj opory trehproljotnogo sterzhnya [On the optimal position of the intermediate support of a three-span rod]. *Materialy XX mizhnarodnoi naukovo-technichnoi konferencii “Progresivna tehnika, tehnologiya ta inzhenerna osvita”*. 23 – 25.
9. Bekshaev S. (2022). Some problems of optimization of rod systems containing compressed elements using additional constraints. *Mechanics and Mathematical Methods*. 4 (2). 83–102.
10. Timoshenko S. P., Gere J. M. (1961). *Theory of elastic stability*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill.

Література

1. Бекшаев С. Я. Качественные методы в задачах повышения устойчивости сжатых стержней. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія «Технічні науки»*, 2016. № 3 (98). С. 74 – 82.
2. Бекшаев С. Я. Повышение устойчивости стержня за счет изменения длины. «World Science», 2018. № 6 (34). Vol. 2. p. 12 – 16.
3. Бекшаев С. Я. О влиянии длины стержня на его критические силы. Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference «International Trends in Science and Technology», 2018. Vol. 1. November 30, 2018, Warsaw. Poland. p. 59 – 64.
4. Бекшаев С. Я. Об оптимальном расположении промежуточной опоры продольно сжатого стержня. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса, 2015. Вип. №60. С. 400 – 406.
5. Бекшаев С. Я. Полуизогнутые формы потери устойчивости и их экстремальные свойства. Тезисы докладов 5-й международной научной конференции *Современные проблемы*

- естественных наук «Тараповские чтения – 2016». 1 – 15 марта 2016 г. Харьков, 2016. С. 80 – 81.
6. Бекшаев С. Я. Полуизогнутые формы потери устойчивости в задаче оптимизации сжатого трехпролетного стержня. Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування, 2016. №2 (77). С. 132 – 139.
 7. Бекшаев С. Я. Некоторые вопросы устойчивости многопролетных стержней. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2016. Вип. №65. Одеса. С. 21 – 27.
 8. Бекшаев С. Я. Об оптимальном положении промежуточной опоры трехпролетного стержня. Матеріали XX міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 10 – 13 вересня 2019 р., м. Київ – м. Херсон. 2019. С. 23 – 25.
 9. Бекшаев С. Я. Деякі задачі оптимізації стрижневих систем, що містять стиснуті елементи, із застосуванням додаткових в'язей. Механіка та математичні методи, 2022. Том 4. Вип. 2. С. 83 – 102.
 10. Timoshenko S. P., Gere J. M. Theory of elastic stability. New York. McGraw-Hill, 1961. second edition. 541 pp.

Sergey Bekshaev

Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture,
Senior Lecturer
Didrihsona str., 4, Odesa, Ukraine, 65029
s.bekshayev@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5752-5321

For references:

S. Bekshaev. (2024). Numerical study of the influence of the length of a rod on its critical forces. *Mechanics and Mathematical Methods*. VI (1). 134–142.

Для посилань:

Бекшаев С. Я. Чисельне дослідження впливу довжини стрижня на його критичні сили. *Механіка та математичні методи*, 2024. Т. VI. № 1. С. 134–142.

Наукове видання

МЕХАНІКА ТА МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ
MECHANICS AND MATHEMATICAL METHODS

Науковий журнал
(українською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск: Ковров А. В.

Підписано до друку 13.04.2024 р.
Формат 60×84/8 Папір офісний Гарнітура Times
Цифровий друк. Ум.-друк. арк. 16,5.
Наклад 50 прим. Зам. №24-7Е

Видавець і виготовлювач:
Одеська державна академія будівництва та архітектури
Свідоцтво ДК № 4515 від 01.04.2013 р.
Україна, 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4.
тел.: (048) 729-85-34, e-mail: rio@odaba.edu.ua

Надруковано в авторській редакції з готового оригінал-макету
в редакційно-видавничому відділі ОДАБА