

DOI: 10.32347/2076-815X.2024.85.257-267

УДК 539.3

к.т.н., доцент **Кошевий О.П.**,

koshevyi.op@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-7796-0443,

к.т.н., доцент **Кошева В.О.**,

kosheva.vo@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6178-8837,

к.т.н., доцент **Левківський Д.В.**,

levkivskyi.dv@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2964-1605,

Янсонс М.О.,

iansons.mo@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6174-0403,

Чубарев А.Г.,

chubarev_ah@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6620-639X,

Марчук О.С.,

marchuk.os@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-2497-1405

Київський національний університет будівництва і архітектури

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ В МІСЦЯХ ПЕРЕХОДІВ ТА КОМПЕНСАТОРІВ ПРИ КОМПЛЕКСНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Приведено основні ідеї та можливості чисельного моделювання, дослідження та аналізу напружено-деформованого стану, міцності та стійкості споруд магістральних трубопроводів в місцях переходів та компенсаторів за допомогою власного програмного забезпечення з використанням модифікованого методу прямих та розрахункового програмного комплексу LIRA від дії комплексного навантаження. Створена комплексна модель споруди на основі BIM технологій використовується для подальшого прийняття оптимальних проектних рішень і значно прискорює проектні роботи. Результати чисельного дослідження комплексної просторової моделі та висновків про міцнісні характеристики трубопроводів значно розширюють можливості в прийнятті проектних рішень та створенні перспективних розробок на їх основі.

Ключові слова: комплексні чисельні просторові моделі; комп'ютерне моделювання; BIM технології; модифікований метод прямих; напружено-деформований стан; міцність; стійкість; магістральні трубопроводи; переходи та компенсатори; оптимальний варіант проекту.

Для дослідження напружено-деформованого стану, міцності та стійкості споруд, що враховує світовий та вітчизняний досвід проектування конструкцій

з використанням сучасних розрахункових методів та BIM технологій, колективом авторів створено методичку чисельного моделювання спрямовану на вирішення важливої соціально-економічної та наукової проблеми, що пов'язана з питаннями будівництва нових, реконструкції та відновлення існуючих споруд. При проектуванні таких споруд необхідно використовувати сучасні методи обстеження стану об'єкту, не стандартні підходи проектування, з використанням новітніх методів та розрахункових програмних комплексів на основі створення просторових моделей споруд, з використанням BIM технологій [8], для отримання оптимальної матеріалоємності поряд із збереженням несучої здатності конструкції [11,12].

При проектуванні та побудові магістральних трубопроводів часто виникають проблеми з влаштуванням переходів через автодороги, залізничні колії, проїзди та обходи існуючих споруд, компенсатори та інше. Також у військових умовах при атаках на інфраструктурні об'єкти можливе часткове пошкодження або повне руйнування таких споруд, що потребує дослідження та оцінки їх напружено-деформованого стану, міцності та стійкості для прийняття проектних рішень по відновленню, реконструкції та будівництву переходів в магістральних трубопроводах.

В статті розглядається чисельне моделювання НДС магістральних трубопроводів в місцях переходів через перешкоди на основі створення просторової моделі розрахунку з використанням власного програмного забезпечення [4,5] та розрахункового програмного комплексу LIRA від дії комплексного навантаження. Для чисельного моделювання були розглянуті зі сталеві труби довжиною 8м, з жорстким заземленням по кінцям, зовнішнім діаметром 530мм, з товщиною стінок 10мм, 16мм і 20мм.

Комплексне навантаження формувалось за допомогою власного програмного забезпечення з використанням модифікованого методу прямих у вигляді переміщень, що діють на внутрішню та зовнішню поверхні трубопроводу [1,2].

Метод прямих є комбінованим методом розв'язування задач математичної фізики, який використовує, зведення вихідних рівнянь до звичайних диференціальних рівнянь, які розв'язувались аналітичними методами. Класичний варіант методу прямих не є вільним від значних ускладнень. По-перше, виникають проблеми з побудовою граничних умов для редукованих рівнянь, які отримані методом скінченних різниць, особливо коли вихідні граничні умови природні. По-друге, побудувати загальний розв'язок системи звичайних диференціальних рівнянь майже неможливо.

Модифікований метод прямих, використовує для зниження вимірності проекційний метод, а вихідні граничні умови обираються природними і потім частково потрапляють до редукованих рівнянь [1,9].

Важливим позитивом також є побудова редукованих граничних задач, ідеально пристосованих до застосування найбільш ефективного методу розв'язування одновимірних граничних задач – методу дискретної ортогоналізації С.К. Годунова [3,10].

На рис.1 показана розрахункова схема трубопроводу з величинами навантажень, що виникають на поверхнях трубопроводів.

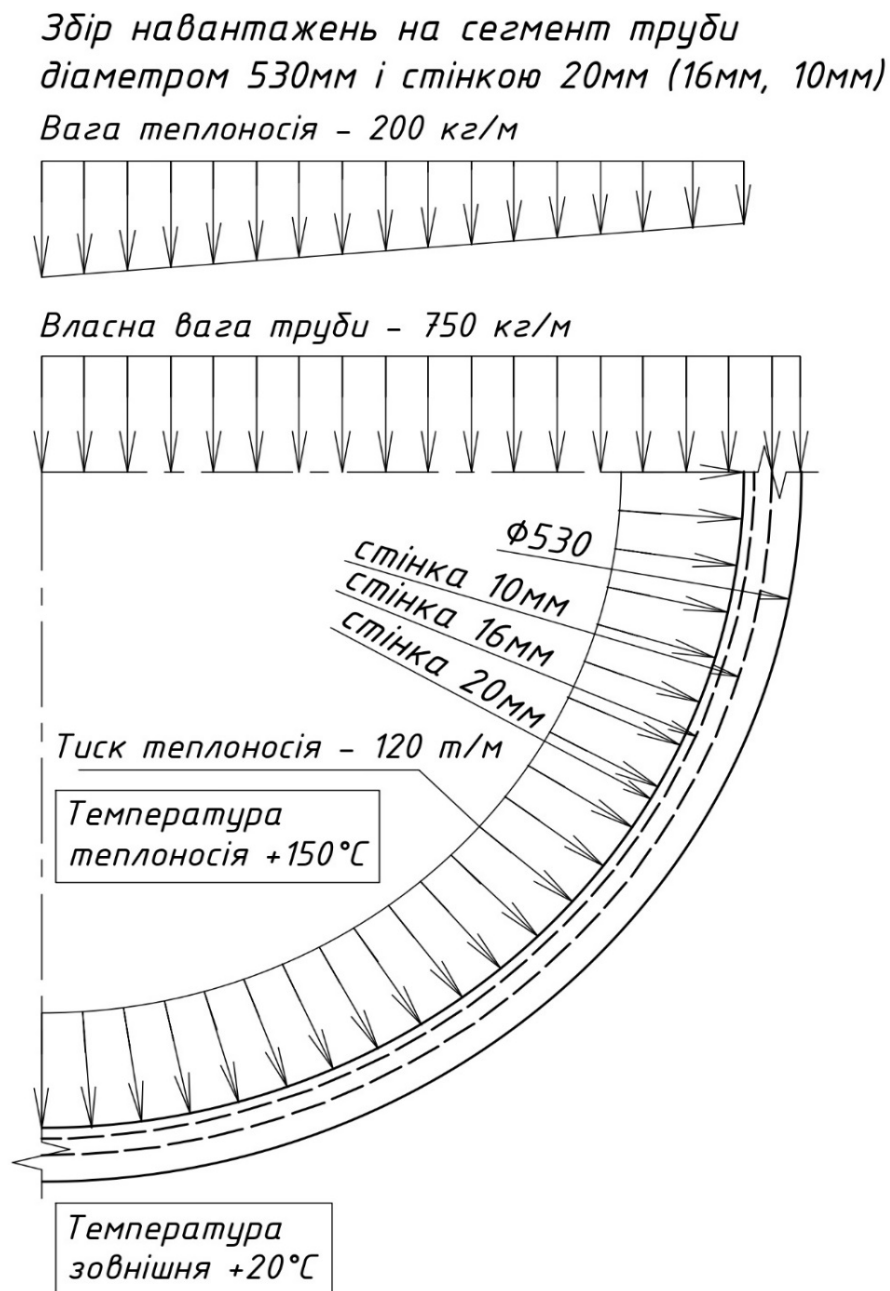


Рис.1. Розрахункова схема трубопроводу з навантаженнями

Далі сформоване комплексне навантаження автоматично передавалось в розрахунковий комплекс LIRA де проводилось чисельне моделювання стану переходів в трубопроводах [6,7].

В результаті чисельного моделювання напружено-деформованого стану магістральних трубопроводів в місцях переходів та компенсаторів за допомогою розрахунковому комплексу LIRA отримані поля переміщень по осям X, Y, Z, на рис.2 показані переміщення по осям U_x (рис. 2.1), U_y (рис. 2.2), U_z (рис. 2.3) для трубопроводів товщиною 10мм від комплексного навантаження, максимальне переміщення виникає по середині прольоту трубопроводу.

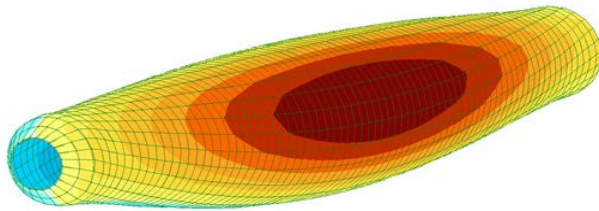


Рис.2.1. Деформована схема та переміщення U_x .

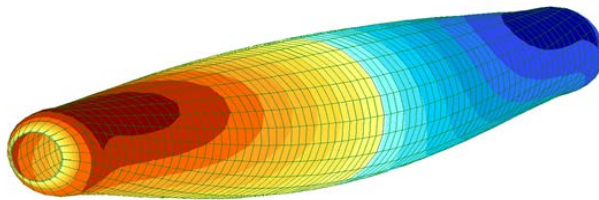


Рис.2.2. Деформована схема та переміщення U_y .

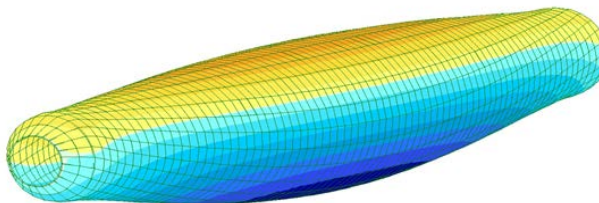


Рис.2.3. Деформована схема та переміщення U_z .

В комплексному навантаженні на трубопроводах були враховані такі види: -власна вага труби довжиною 8м в залежності від товщини (10мм, 16мм, 20мм) - вага теплоносія (води) всередині труби, - тиск води всередині труби (12 атм. = 120 т/м²), - температура теплоносія всередині труби – 150 °С, - температура на зовнішній поверхні труби під утеплювачем - 20 °С, - вага утеплювача та зовнішнього опорядження. Напруження і переміщення визначені від комбінації навантажень за допомогою модифікованого методу прямих [5,6]. Всі навантаження умовно прийняті як постійні.

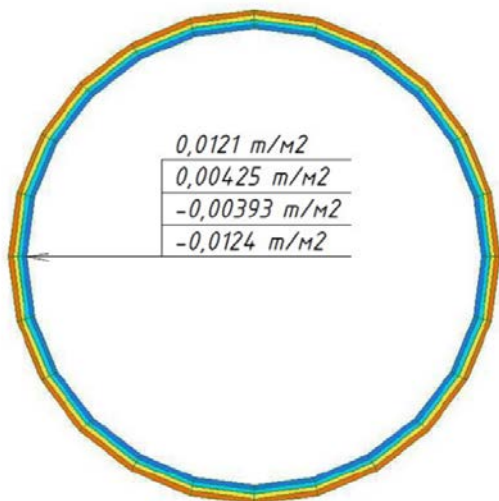


Рис.3.1. Напруження σ_{xx}

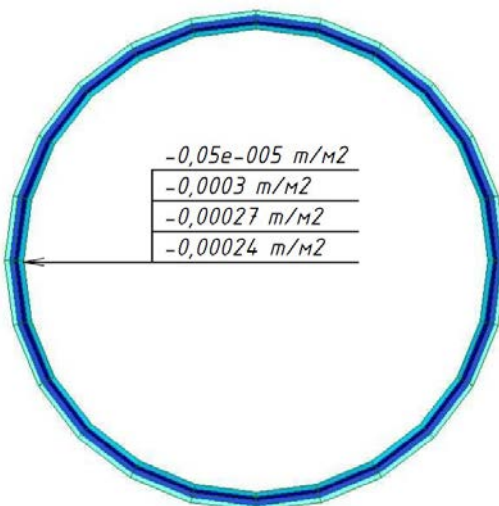


Рис.3.2. Напруження σ_{yy}

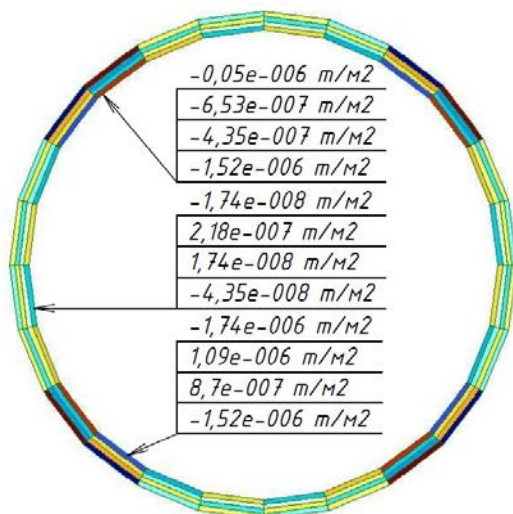


Рис.3.3. Напруження σ_{zz}

На рис. 3 показані результати розрахунку нормальних σ_{xx} (рис. 3.1), σ_{yy} (рис. 3.2), σ_{zz} (рис. 3.3) в перерізі трубопроводу посередині прольоту від комплексного навантаження при товщині трубопроводу 10 мм, що були визначені власним програмним забезпеченням за допомогою модифікованого методу прямих.

На рис. 4 показані результати розрахунку нормальних, дотичних напружень та переміщень від комплексного навантаження в опорному перерізі трубопроводу при $X=0$ м та товщині трубопроводу 10 мм.

На рис. 5 показані результати розрахунку нормальних, дотичних напружень та переміщень від комплексного навантаження в перерізі посередині прольоту трубопроводу при $X=4$ м та товщині трубопроводу 10мм.

В таблиці 1 представлені максимальні значення величин нормальних, дотичних напружень та переміщень чисельного моделювання трубопроводів в залежності від товщини 10 мм, 16 мм та 20 мм в опорному перерізі при $X=0$ м.

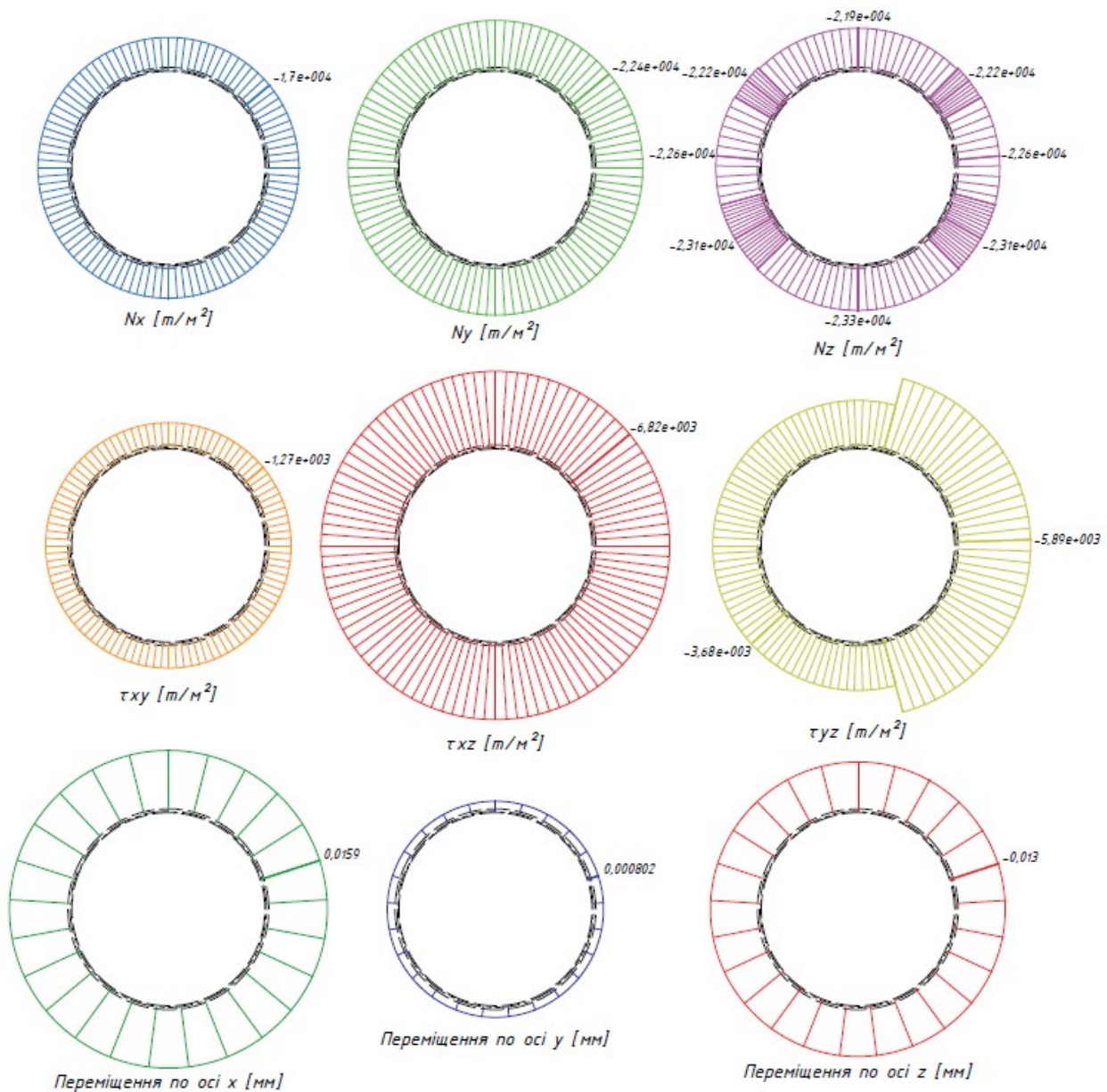


Рис. 4. Напруження та переміщення в опорному перерізі

Таблиця 1

Товщина трубопро- воду, мм	Нормальні напруження, МПа			Дотичні напруження, МПа			Переміщення по осям, мм		
	σ_{xx}	σ_{yy}	σ_{zz}	τ_{xy}	τ_{yx}	τ_{xz}	X	Y	Z
10	170	224	234	12,7	68,2	58,2	0,016	0,0008	0,013
16	169	266	233	13,0	63,5	36,6	0,010	0,0008	0,008
20	169	266	233	13,0	63,2	18,9	0,008	0,0008	0,006



Рис. 5. Напруження та переміщення посередині прольоту трубопроводу

В таблиці 2 представлені максимальні значення величин нормальних, дотичних напружень та переміщень чисельного моделювання трубопроводів в залежності від товщини 10 мм, 16 мм та 20 мм в перерізі по середині прольоту при $X=4\text{м}$.

Таблиця 2

Товщина Трубопро- воду, мм	Нормальні напруження, МПа			Дотичні напруження, МПа			Переміщення по осям, мм		
	σ_{xx}	σ_{yy}	σ_{zz}	τ_{xy}	τ_{yx}	τ_{xz}	X	Y	Z
10	0,276	29,7	230	3,92	0,101	0,767	1,59	0,003	1,89
16	0,214	18,2	231	2,39	0,062	0,471	1,02	0,0031	1,26
20	0,283	14,3	231	1,88	0,049	0,372	0,848	0,003	1,07

Висновки. По результатам чисельного моделювання напружено-деформованого стану магістральних трубопроводів в місцях переходів та компенсаторів при товщині 10 мм, 16 мм, 20 мм від комплексного навантаження можна відмітити досить значні величини нормальних напружень, які виникають в місцях поворотів та закріплень, причому товщина трубопроводу слабо впливає на зміну величини та розподілення напружень в цих місцях. Найбільші напруження виникають на внутрішній поверхні трубопроводів, що пов'язано з температурними навантаженнями та навантаженнями від внутрішнього тиску теплоносія в трубопроводах.

Посередині прольоту величини напружень та їх розподілення практично не змінюються, також майже не змінюються величини деформацій, вони практично не залежать від збільшення товщини трубопроводів, що дає можливість по сутевій економії матеріалів та для прийняття оптимальних проектних рішень.

Створене програмне забезпечення значно спрощує та прискорює дослідження НДС будівель і споруд, а також дає можливість поряд з розрахунковим комплексом LIRA швидко приймати оптимальні проектні рішення [11] за рахунок комплексного та одночасного використання різних чисельних та аналітичних математичних методів дослідження.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Чибіряков В.К., Станкевич А.М., Кошевий О.П., Левківський Д.В., Краснеєва А.О., Пошивач Д.В., Чубарев А.Г., Шорін О.А., Янсонс М.О., Сович Ю.В. Модифікований метод прямих, алгоритм його застосування, можливості та перспективи. // Н.т. збірник «Містобудування та територіальне планування», вип. 70, К.:КНУБА, 2019р. – с.595-616.
2. Чибіряков В.К., Станкевич А.М., Кошевий О.П., Левківський Д.В., Краснеєва А.О., Пошивач Д.В., Чубарев А.Г., Шорін О.А., Янсонс М.О., Сович Ю.В. Чисельна реалізація модифікованого методу прямих. // Н.т. збірник «Містобудування та територіальне планування», вип. 74, К.: КНУБА, 2020р. – с.341-359.
3. В.К. Чибіряков, А.М. Станкевич, Д.В. Левківський /Особливості зниження вимірності рівнянь теорії пружності узагальненим методом прямих. // Містобудування та територіальне планування: Н.т. Збірник. – Вип. 46. – К.: КНУБА, 2012. – С. 613-624.
4. Кошевий О.П., Левківський Д.В., Чубарев А.Г., Янсонс М.О. Модифікований метод прямих в статичних задачах вісесиметричних нетонких пластин/ Scientific-and-technical collected articles “Strength of materials and theory of structures”.Issue 109. – К.: KNUCA, 2022. – С. 342-358.
5. О.П. Кошевий, Д.В. Левківський, М.О. Янсонс, А.Г. Чубарев, О.С. Марчук Моделювання температурних впливів в масивних тілах за допомогою модифікованого метода прямих / Містобудування та територіальне планування: Н.т. Збірник. – Вип. 82. – К.: КНУБА, 2023. – С. 185-197.
6. О.П. Кошевий, Д.В. Левківський, В.О. Кошева, М.О. Янсонс, А.Г. Чубарев, О.С. Марчук Побудова комплексної моделі реконструкції шляхопроводу на основі обстеження з використанням вим-технологій/ Містобудування та територіальне планування: Н.т. Збірник. – Вип. 83. – К.: КНУБА, 2023. – С. 143-155.

7. О.П. Кошевий, Д.В. Левківський, В.О. Кошева, М.О. Янсонс, А.Г. Чубарев, О.С. Марчук Чисельне моделювання просторової моделі шляхопроводу для оцінки міцності та жорсткості на основі обстеження з використанням розрахункового комплексу LIRA / Містобудування та територіальне планування: Н. Збірник. – Вип. 84. – К.: КНУБА, 2023. – С. 171-180.
8. Кошевий О.П., Кошева В.О., Тробюк О.М. Системно графічно-інтерпретовані моделі створення енергоефективних будівель / Н.т. збірник “Прикладна геометрія та інженерна графіка”. Вип. 100. Відповід. редактор Ванін В.В. – К.: КНУБА, 2021. – 230 с. 172-181.
9. Чубарев А.Г. Про застосування модифікованого метода прямих в задачах термопружності нетонких пластин // Н.т. збірник «Містобудування та територіальне планування», вип. 80, К.: КНУБА, 2022. – С.486-498.
10. Янсонс М.О. Застосування узагальненого методу прямих для дослідження динамічного напружено-деформованого стану кільцевих нетонких пластин // Н.т. збірник «Математичні проблеми технічної механіки – 2021» Міжнародна н. конф. м. Дніпро, Кам’янське, 2021.
11. Григор’єва Л.О., Іванченко Г.М., Кошевий О.О., Кошевий О.П. Чисельне дослідження параметричної оптимізації вимушених частот коливання оболонки мінімальної поверхні на трапецевидному контурі при термосиловому навантаженні/ “Strength of materials and theory of structures”. Issue 110. – К.: KNUCA, 2023. – С. 430-446.
12. Чибіряков В.К., Кошевий О.П., Чубарев А.Г. Про один алгоритм для розв’язування задач термопружності на основі узагальненого методу прямих // BUILD-MASTER-CLASS-2018: Proceedings of international scientific-practical conference of young scientists. «Видавництво Ліра-К». – Вип. 74 –К.: КНУБА, 2018. – С. 190-191 с.

Candidate of Technical Science, Associate Professor **Koshevyi Oleksandr**,
Candidate of Technical Science, Associate Professor **Kosheva Victoria**,
Candidate of Technical Science, Associate Professor **Levkivskiyi Dmytro**,
Iansons Marina, Chubarev Anton, Marchuk Oleksandr,
Kyiv national university of construction and architecture

NUMERICAL SIMULATION OF STRESS-STRAIN STATE OF MAIN PIPELINES AT TRANSITIONS AND EXPANSION JOINTS AREAS UNDER COMPLEX LOADING

The paper studies the stress-strain state, strength, and stability of trunk pipeline structures in transition and expansion joint areas using numerical simulation. For this purpose, proprietary software was developed using a modified direct method and the LIRA software complex. The study was carried out under complex loading conditions, including temperature effects, internal pressure, and external loads. A comprehensive building model based on BIM technologies was created, which is used for further adoption of optimal design solutions and significantly accelerates design work. The results of a numerical study of a complex spatial model and conclusions about the strength characteristics of pipelines significantly expand the

possibilities for making design decisions and creating promising developments based on them.

Keywords: complex numerical spatial models; computer simulation; BIM technologies; modified direct method; stress-strain state; strength; stability; trunk pipelines; transitions and expansion joints; optimal design option.

REFERENCES

1. Chybiryakov V.K., Stankevych A.M., Koshevyi O.P., Krasneyeva A.O., Poshyvach D.V., Chubarev A.H., Shorin O.A., Iansons M.O., Sovych YU.V. Modyfikovanyy metod pryamykh, alhorytm yoho zastosuvannya, mozhlyvosti ta perspektyvy // *Mistobuduvannya ta terytorial'ne planuvannya: N.t. Zbirnyk.* – Vol. 70. – K.: KNUBA, 2019. – P. 633-655. {in Ukrainian}
2. V.K. Chybiryakov, A.M. Stankevych, O.P. Koshevyi, D.V. Levkivskyi, A.O. Krasneyeva, D.V. Poshyvach, A.H. Chubarev, O.A. Shorin, M.O. Iansons, YU.V. Sovych Chysel'na realizatsiya modyfikovanoho metodu pryamykh // *Mistobuduvannya ta terytorial'ne planuvannya: N.t. Zbirnyk.* – Vol. 74. – K.: KNUBA, 2020. – P. 341-359. {in Ukrainian}
3. V.K. Chybiryakov, A.M. Stankevych, D.V. Levkivskyi. Osoblyvosti znyzhennya vymirnosti rivnyan' teoriiy pruzhnosti uzahal'nenym metodom pryamykh // *Mistobuduvannya ta terytorial'ne planuvannya: N.t. Zbirnyk.* – Vol. 46. – K.: KNUBA, 2012. – P. 613-624. {in Ukrainian}
4. Koshevyi O.P., Levkivskyi D.V., Chubarev A.H., Iansons M.O. Modyfikovanyi metod pryamykh v statychnykh zadachakh visesymetrychnykh netonkykh plastyn (Modified method of direct lines in static problems of axisymmetric thin plates) // *Scientific-and-technical collected articles “Strength of materials and theory of structures”.* Issue 109. – Kyiv: KNUCA, 2022. – P. 342-358. ISSN 2410-2547 {in Ukrainian}
5. O.P. Koshevyi, D.V. Levkivskyi, M.O. Iansons, A.H. Chubarev, O.S. Marchuk Modelyuvannya temperaturnykh vplyviv v masyvnykh tilakh za dopomohoyu modyfikovanoho metodu pryamykh // *Mistobuduvannya ta terytorial'ne planuvannya: N.t. Zbirnyk.* Vol. 82. – K.: KNUBA, 2023. – P. 185-197. {in Ukrainian}
6. O.P. Koshevyi, D.V. Levkivskyi, V.O. Kosheva, M.O. Iansons, A.H. Chubarev, O.S. Marchuk Pobudova kompleksnoyi modeli rekonstruktsiyi shlyakhoprovodu na osnovi obstezhennya z vykorystannyam vim-tekhnologiy // *Mistobuduvannya ta terytorial'ne planuvannya: N.t. Zbirnyk.* – Vol. 83. – K.: KNUBA, 2023. – P. 143-155. {in Ukrainian}
7. O.P. Koshevyi, D.V. Levkivskyi, V.O. Kosheva, M.O. Iansons, A.H. Chubarev, O.S. Marchuk Chysel'ne modelyuvannya prostorovoyi modeli shlyakhoprovodu dlya otsinky mitsnosti ta zhorstkosti na osnovi obstezhennya z vykorystannyam

rozrakhunkovoho kompleksu LIRA (Numerical modeling of a spatial model overpass to assess the strength and rigidity based on the examination of using the calculation complex LIRA) // *Mistobuduvannya ta terytorial'ne planuvannya: N.t. Zbirnyk.* – Vol. 84. – K.: KNUBA, 2023. – P. 171-180. {in Ukrainian}

8. Koshevyi O.P., Kosheva V.O., Trobyuk O.M. Systemno hrafichno-interpretovani modeli stvorenniya enerhoefektyvnykh budivel' (System graphically interpreted models of creating energy-efficient buildings) // *N.t. zbirnyk "Prykladna heometriya ta inzhenerna hrafika"*. Vol. 100. – K.: KNUBA, 2021. – 230 s. P. 172-181. {in Ukrainian}

9. Chubarev A.H. Pro zastosuvannya modyfikovanoho metoda pryamykh v zadachakh termoprzhnosti netonkykh plastyn // *N.t. zbirnyk «Mistobuduvannya ta terytorial'ne planuvannya»*, vol. 80. K.: KNUBA, 2022. – P. 486-498. {in Ukrainian}

10. Iansons M.O. Zastosuvannya uzahal'nenoho metodu pryamykh dlya doslidzhennya dynamichnoho napruzhenno-deformovanoho stanu kil'tsevykh netonkykh plastyn (Application of the generalized method of straight lines for study of the dynamic stress-strain state of rings non-thin plates) // *N.t. zbirnyk «Matematychni problemy tekhnichnoyi mekhaniky. 2021» Mizhnarodna naukova konferentsiya m. Dnipro, Kam"yans'ke, 2021.* {in Ukrainian}

11. Hryhor'yeva L.O., Ivanchenko H.M., Koshevyi O.O., Koshevyi O.P. Chysel'ne doslidzhennya parametrychnoyi optymizatsiyi vymushenykh chastot kolyvannya obolonky minimal'noyi poverkhni na trapetsevydnomu konturi pry termosylovomu navantazhenni (Numerical optimization of forced vibration frequencies of minimal surface shells under thermomechanical loading)// *"Strength of materials and theory of structures"*. Issue 110. – K.: KNUCA, 2023. – 313. P. 430-446. {in Ukrainian}

12. Chybiryakov V.K., Koshevyi O.P., Chubarev A.H. Proodyn alhorytm dlya rozv'yazuvannya zadach termoprzhnosti na osnovi uzahal'nenoho metodu pryamykh (About one algorithm for solving problems of thermoelasticity based on the generalized method of straight lines) // *BUILD-MASTER-CLASS-2018: Proceedings of international scientific-practical conference of young scientists.* «Vydavnytstvo Lira-K». – Vyp. 74 –K.: KNUBA, 2018. – 190-191 s. {in Ukrainian}