

УНІФІКАЦІЯ МЕТОДІВ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ТРУБОПРОВІДНИХ СИСТЕМ З МЕТОЮ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

© Грінченко Г.С., Артюх С.М., Грінченко В.В., Негодів С.С.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Грінченко Ганна Сергіївна (Грінченко Анна Сергеевна, Hrinchenko Hanna): ORCID: 0000-0002-6498-6142; e-mail: hrinchenko@uira.edu.ua кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Артюх Світлана Миколаївна (Артюх Светлана Николаевна, Artiukh Svitlana): ORCID: 0000-0003-0804-6313; email: artyhsn@gmail.com, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Грінченко Володимир Вікторович (Грінченко Владимир Викторович, Hrinchenko Volodymyr): ORCID: 0000-0001-5721-9175; e-mail: green2015@ukr.net, Українська інженерно-педагогічна академія, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Негодів Сергій Станіславович (Негодів Сергей Станиславович, Nehodov Serhii): ORCID: 0000-0003-3561-6924; e-mail: titansv2017@gmail.com, Українська інженерно-педагогічна академія, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

В статті розглянуто можливість застосування алгоритмів та методів технічної діагностики та оцінювання залишкового ресурсу трубопроводів, що транспортують енергоносії на основі методів контролю та оцінки технічного стану трубопроводів енергетичного обладнання. Для підтвердження теоретичних припущень проаналізовано технічні характеристики трубопроводу, що має в якості енергоносія водень та зроблено розрахунок напружено-деформованого стану трубопроводу на основі побудованої кінцево-елементної моделі ділянки трубопроводу. Проведено розрахунок напруженого стану для внутрішніх температурних навантажень трубопроводу при температурі 0° та -20°С, що дало змогу виявити та оцінити напруження, що виникають на ділянці. В результаті проведеного дослідження виявлено не значний вплив температур на стан трубопроводу та відхилення щодо розподілу напружень. Спираючись на результати досліджень запропоновано уніфіковану систему методів технічної діагностики на основі системи типізації розрахунку залишкового ресурсу трубопроводів при різних типах навантаження в залежності від температури та інших технологічних характеристик трубопроводних систем на основі розробленого технологічного коду. Такий підхід дає можливість проводити оцінку технічного стану шляхом вибору відповідного методу розрахунку для трубопроводів різного призначення.

Ключові слова: трубопровід, технічна діагностика, безпечна експлуатація, кодифікація, систематизація, класифікація.

Hrinchenko H., Artiukh S., Hrinchenko V., Nehodov S. “Unification of technical diagnostic methods of pipeline systems with the purpose of ensuring safe operation”

The article considers the possibility of applying algorithms and methods of technical diagnostics and assessment of the residual resource of pipelines that transport energy carriers based on methods of control and assessment of the technical condition of pipelines of energy equipment. To confirm the theoretical assumptions, the technical characteristics of the pipeline, which has hydrogen as an energy carrier, were analyzed, and the stress-strain state of the pipeline was calculated based on the constructed finite element model of the pipeline section. The calculation of

the stress state was carried out for the internal temperature loads of the pipeline at temperatures of 0° and -20°C, which made it possible to identify and evaluate the stresses occurring in the area. As a result of the conducted research, it was found that the temperature does not have a significant effect on the state of the pipeline and deviations in the stress distribution. Based on the research results, a unified system of technical diagnostics methods is proposed based on the typification system for calculating the residual resource of pipelines under different types of load depending on temperature and other technological characteristics of pipeline systems based on the developed technological code. This approach makes it possible to assess the technical condition by choosing an appropriate calculation method for pipelines of various purposes.

Keywords: pipeline, technical diagnostics, safe operation, codification, systematization, classification.

Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Для забезпечення експлуатаційної безпеки трубопровідних систем різного призначення необхідно мати систему нормативної документації, яка відображатиме вимоги для визначення ресурсу трубопроводів, пов'язані з параметрами їх навантаження. Таку систему можна створити на основі типізації та уніфікації трубопроводів і відповідного розрахунку їх залишкового ресурсу. Інструментом типізації у широкому розумінні є класифікація об'єктів чи процесів за ознаками, необхідні рішення поставленої завдання, в даному випадку, таким принципом класифікації можна обрати методи контролю.

До завдань досліджень входить створення нормативного забезпечення безпечної експлуатації на основі розробки науково-обґрунтованої моделі та алгоритму розрахунку залишкового ресурсу трубопроводів різного призначення. Математична модель дасть змогу визначити здатність виробу (в даній роботі, трубопроводів) виконувати задані функції протягом проектного терміну експлуатації та прогнозувати ресурс, тобто можливість продовжити проектні терміни безпечної експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Завданням оцінка технічного стану та продовження терміну служби енергообладнання та різних носіїв енергоносіїв присвячено багато науково-технічних робіт. Оцінка технічного стану обладнання енергоблоків вимагає комплексного підходу. Така комплексна оцінка пропонується авторами визначення якості експлуатації трубопровідних систем з урахуванням особливостей їх напружено-деформованого стану та сейсмічної стійкості [1-4]. Методи дослідження: розрахунки з використанням математичної моделі; порівняння результатів розрахунку, прогнозування граничних параметрів технічного стану та моніторинг механічних властивостей матеріалу магістрального трубопроводу; огляд, кваліфікація, визначення залишкового ресурсу будівель, споруд, фундаментів та металевих конструкцій з урахуванням геотехнічних та сейсмотектонічних умов. Цей алгоритм дослідження можна взяти за основу для оцінки технічного стану, а саме його загальну модель.

Для забезпечення безпеки понад проектний термін та якості роботи енергообладнання необхідно створити ефективний механізм вивчення технічного стану, який би максимально оптимізував його роботу, виходячи із сприятливого співвідношення економічних показників та безпеки. Такі підходи розкрито авторами у наукових дослідженнях [5-8].

Разом з тим є ряд невирішених питань, щодо можливості проведення технічної діагностики та забезпечення безпеки експлуатації трубопроводів іншого призначення, що мають відмінні від запропонованих енергоносіїв, адже в роботах [1-8], розглядаються енергообладнання та трубопровідні системи атомного комплексу.

Метою роботи є уніфікація методів контролю трубопровідних систем різного призначення на основі запропонованої моделі технічної діагностики з метою забезпечення безпеки їх експлуатації.

Виклад основного матеріалу

В якості трубопровідних систем розглянемо ділянку трубопроводу, що транспортує водень та водневі суміші. Даний тип енергоносія має ряд особливостей, відмінності від транспортування теплоносія, але за модель технічної діагностики та методів контролю пропонується взяти існуючі методи дослідження для трубопровідних систем з теплоносієм (пара, вода).

Водень і водневі суміші розглядаються як перспективне паливо. Для широкомасштабного застосування водню необхідно вирішити проблеми з його транспортуванням.

Водень до місця його використання можна транспортувати в газоподібному і рідкому станах, а також за допомогою рідких та твердих носіїв, які містять водень у зв'язаному вигляді. Носіями можуть бути гідриди металів, наноструктури, рідкі вуглеводні та інші багаті воднем з'єднання. В даний час водень транспортується у скрапленому вигляді в криогенних автомобільних та залізничних цистернах та у газоподібному стані шляхом трубопровідних систем або трейлерами, що оснащені спеціальними трубами-контейнерами під тиском. Використання транспортних засобів застосовують, як правило, коли немає доступу до трубопроводу. Транспортування газоподібного водню за допомогою трубопровідних систем може відбуватись двома шляхами:

- По спеціальним водневим трубопроводам;
- По існуючим трубопроводам природного газу.

В будь-якому варіанті для тривалого зберігання, а також для транспортування рідкого водню з мінімальними втратами від випаровування бажано підтримувати його в переохолодженому стані.

На рис. 1. представлений фрагмент труби з зовнішнім діаметром $d = 0,12$ м, товщиною стінки $0,02$ м і довжиною 1 метр, яка жорстко закріплена по торцях. механічні та температурні характеристики якої наведені в таблиці 1 і на рис. 2.

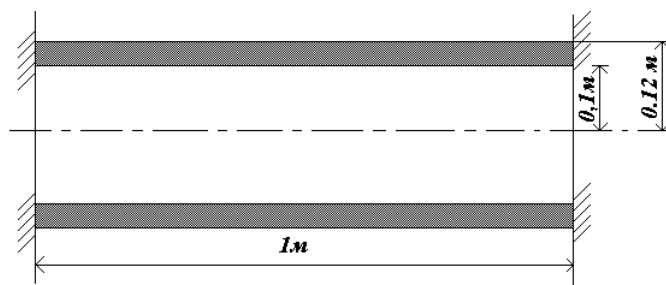


Рис. 1 – Ділянка труби, для якої проводиться рішення задачі термопружності

Таблиця 1 – Властивості трубопроводу в залежності від температури

Температура випробування, °С	20	10	0	-5	-10	-20
Температура випробування, °К	293	283	273	268	263	253
Модуль нормальної пружності, Е, МПа	200	208	203	197	189	177
Модуль пружності при здвигу G, МПа	78	77	76	73	69	66
Щільність, ρ , г/м ³	0,913	0,914	0,914	0,915	0,916	0,917
Коефіцієнт теплопровідності, λ	0,25	0,26	0,26	0,28	0,30	0,30
Коефіцієнт лінійного розширення, α (10^{-6} (°С))	59,4	59,41	59,42	59,43	59,44	59,45
Питома теплоємність, С, Дж/(кг С)	1680	1600	1500	1450	1350	1200

Класифікація трубопроводів і відповідно методів здійснимо відповідно до [4] та закодифікуємо їх відповідно до температурного випробування:

ТВ20 – трубопровід з водневим енергоносієм з температурою випробувань 20°C;

ТВ10 – трубопровід з водневим енергоносієм з температурою випробувань 10°C;

ТВ00 – трубопровід з водневим енергоносієм з температурою випробувань 0°C;

ТВ-5 – трубопровід з водневим енергоносієм з температурою випробувань -5°C;

ТВ-10 – трубопровід з водневим енергоносієм з температурою випробувань -10°C;

ТВ-20 – трубопровід з водневим енергоносієм з температурою випробувань -20°C;

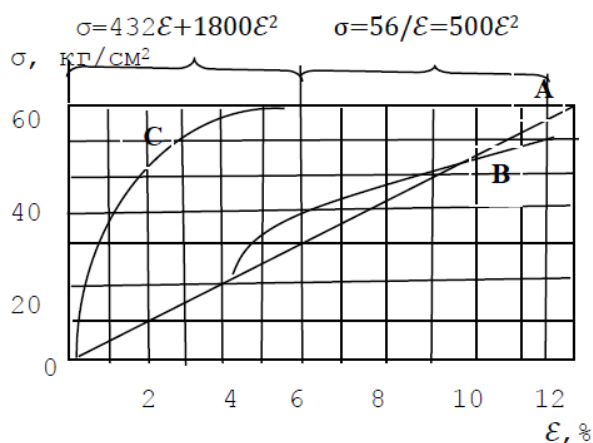


Рис. 2 – Діаграма статичного опору поліетиленових труб (при σ – напруга, кг/см^2 , ϵ - подовження, %): А – спрощене рівняння: $\sigma=5\epsilon$; В – крива опору; С – діаграма розтягнення при певній швидкості деформації

Для вирішення термоміцнісної задачі спершу вирішується завдання розподілу температур по об'єму труби, потім отримане температурне поле прикладається в якості граничних умов в задачі міцності. Розглянемо рішення температурної задачі методом кінцевих елементів (КЕ).

На рисунку 3 представлена КЕ модель розглянутого фрагмента труби.

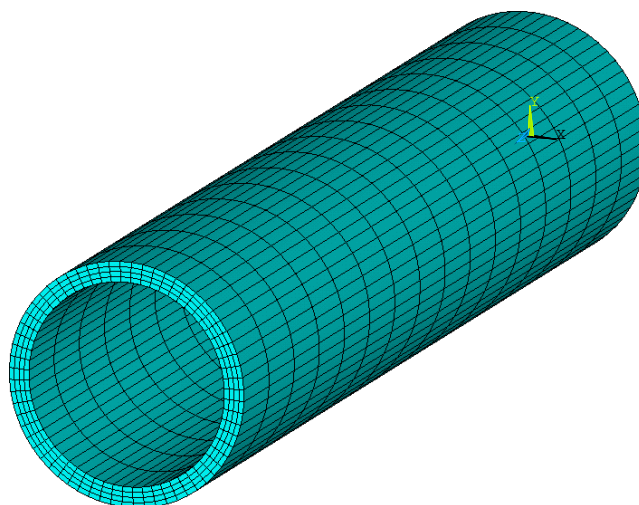


Рис. 3 – Кінцево-елементна модель трубопроводу

Граничні умови, що накладаються на модель, показані на рис. 4. На внутрішній поверхні задається температура -20°C , на зовнішній поверхні - кімнатна температура 30°C і коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 5,678 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

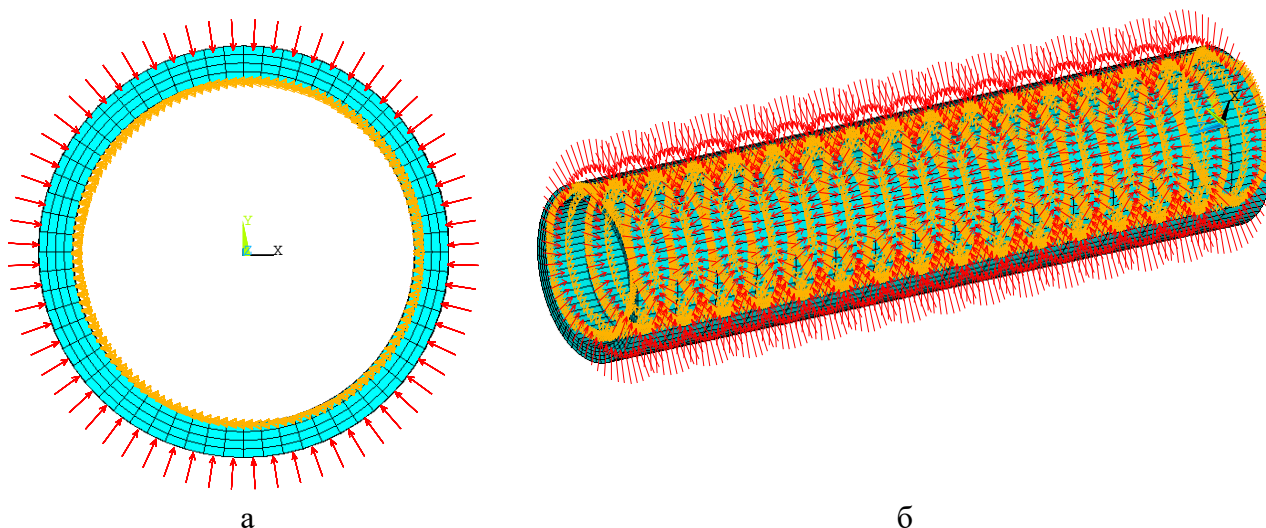


Рис. 4 – Граничні умови: а) - вид з торця; б) - аксонометрія

В результаті КЕ розрахунку отримуємо розподіл напружено деформованого стану ділянки трубопроводу в залежності від внутрішньої температури. Як видно з рисунка, температури всередині і зовні труби мало відрізняються і рівні температурі протікає по трубі теплоносія.

Результати рішення завдання забезпечення міцності з урахуванням температури представлені на рис. 6 при температурі 0°C і на рис. 7 при температурі -20°C .

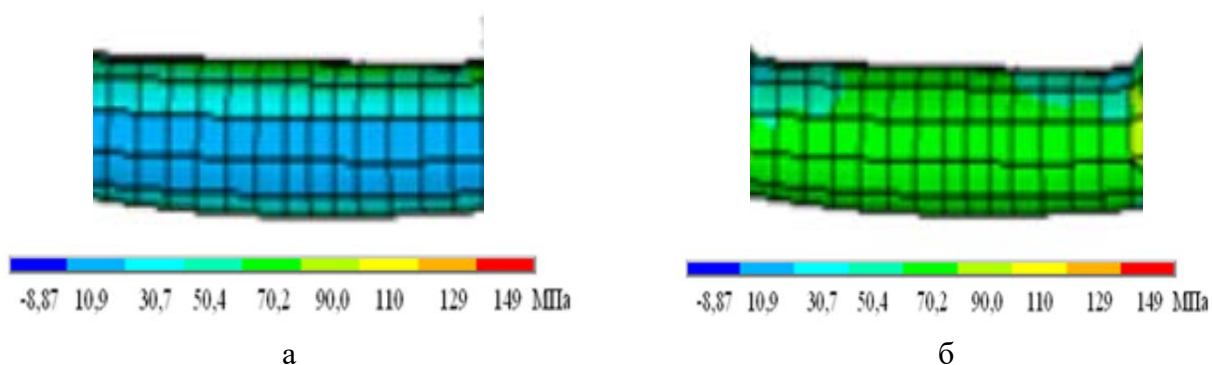


Рис. 5 – Напружено деформований стан при температурі: а) 0°C ; б) -20°C

Як видно з малюнків, при розрахунку напружено-деформованого стану (НДС) конструкції, температура не погіршує стан труби, але дає додаткові навантаження, що пропонується врахувати при оцінюванні технічного стану та безпеки подальшої експлуатації.

На основі математичної моделі уніфіковано методи розрахунку та розроблено типізовану систему визначення залишкового ресурсу трубопроводів за різних типів навантаження та температурного режиму (табл. 2), згідно з кодифікатором [4] та

Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка

запропонованим кодифікатором трубопроводів з водневим енергоносієм при різних температурах, що дозволяє підвищити достовірність прогнозу.

Таблиця 2 – Система типізації розрахунку залишкового ресурсу трубопроводів при різних типах навантаження

Код трубопроводу	Моделі визначення ресурсу при технічній діагностиці трубопроводів різного призначення та різного навантаження	Примітка
К2В01 К2П01 К2Д01 К3В01 К3П01 К3Д01 К4П01 ТВ20 ТВ10	$N = \left[\frac{(\varepsilon_a - \sigma_{-1}/E)A}{\ln(1/(1-\varphi))} \right]^m$	ε_a – малоциклова втома; σ_{-1} – межа втоми; E – модуль пружності; φ – коефіцієнт поперечного січення
К1В02 К2В02 К2Д02 К3В02 К3Д02 К4П02 ТВ00	$N = \left[\frac{(\varepsilon_{a_i} - \sigma_{-1}/E)A}{\ln\left(\frac{1}{1-\varphi}\right)} \right]^m$	ε_{a_i} – малоциклова втома при блочному навантаженні
К2В03 К2Д03 К3В03 К3Д03	$N = \frac{2}{(n-2)CY^n \pi^{n/2} \Delta\sigma^n} \times \left[\frac{1}{a_o^{\frac{n-2}{2}}} - \frac{1}{a_c^{\frac{n-2}{2}}} \right]$	n – число циклів до руйнування; C – константа, що характеризує циклічне руйнування
К2В13 К2Д13 К3В13 К3Д13	$N = \left[\frac{(\varepsilon_a - \sigma_{-1}/E)A}{\ln(1/(1-\varphi))} \right]^m$	m – коефіцієнт, що характеризує механічні руйнування
К2В23 К2Д23 К3Д23 ТВ-5 ТВ-10 ТВ-20	$N = \frac{2}{(n-2)CY^n \pi^{n/2} \Delta\sigma^n} \times \left[\frac{1}{a_o^{(n-2)/2}} - \frac{1}{a_c^{(n-2)/2}} \right]$	Y – коефіцієнт інтенсивності напруження при низькотемпературних руйнуваннях

Наприклад, при визначенні залишкового ресурсу та технічної діагностики трубопроводу, особливо важливого в системі безпеки при проведенні розрахунку, необхідно вирішувати комплексне завдання впливу всіх типів навантаження, та враховувати температурне навантаження (ТВ-10,ТВ-20), що буде враховано за допомогою відповідного модуля пружності та величина малоциклових навантажень. А наприклад, у технологічному коді для дренажної трубопровідної системи від ПНД (підігрівач низького тиску) до ПВД (підігрівач високого тиску) тип навантаження та середовище теплоносія будуть позначатися символами - А13, що говорить, що при оцінці віброміцності трубопровідної системи величини малоциклового навантаження не враховується, а вихідними параметрами є лише амплітуда та частота вібрації, швидкість та величина зносу стінок трубопроводів. Запропонована система стане основою для удосконалення нормативного забезпечення з технічної діагностики трубопровідних систем різного призначення для оцінки та забезпечення експлуатаційної безпеки.

Висновки

1) Проаналізовано вплив температурного навантаження енергоносія на напружено-деформований стан трубопровідної системи та виявлено не значний вплив низьких температур у порівнянні з нормальними умовами експлуатації, але такий вплив викликає малоциклові навантаження, що необхідно враховувати при технічній діагностиці трубопроводів різного призначення.

2) Запропоновано систематизацію трубопровідних систем з урахуванням температури енергоносія та критеріями навантаження трубопровідних систем та елементів конструкцій та відповідний технологічний кодифікатор для трубопроводів з енергоносієм різної температури;

3) На основі систематизації запропоновано систему типізації розрахунку залишкового ресурсу трубопроводів при різних типах навантаження, що дає змогу враховувати температурні навантаження та вплив їх на напружено-деформований стан.

Список використаних джерел:

1. Кіпоренко Г. С. Оцінка технічного стану трубопровідних систем АЕС на відповідність нормативним параметрам / Г. С. Кіпоренко, М. Є. Пахалович, О. М. Хорошилов // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2016. – Вип. 4. – С. 146–152.
2. Кіпоренко Г. С. Вдосконалення методики розрахунку опору крихкому руйнуванню трубопроводів Південно-Української АЕС / Г. С. Кіпоренко, М. Є. Пахалович // Системи обробки інформації. – 2016. – Вип. 7. – С. 181–184.
3. Algorithm of technical diagnostics of the complicated damage to the continued resource of the circulation pipeline of the nuclear power plant / H. Hrinchenko, R. Trisch, V. Burdeina, S. Chelysheva // Problems of Atomic Science and Technology. Section : Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science. – 2019. – № 2 (120). – P. 104–110. <https://doi.org/10.46813/2019-120-104>.
4. Кіпоренко Г. С. Удосконалення нормативного забезпечення експлуатаційної безпеки трубопровідних систем атомних електростанцій : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.01.02 / Г. С. Кіпоренко ; Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2010. – 20 с.
5. Cancemi S. Inverse Heat Conduction Problem in Estimating NPP Pipeline Performance / S. Cancemi, R. Frano // Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science. – Vol. 8, iss. 3. – P. 034501. <https://doi.org/10.1115/1.4053689>.
6. Inverse Space Marching Method for Determining Temperature and Stress Distributions in Pressure Components / J. Taler [et al.] // Developments in Heat Transfer. – Rijeka, Croatia, 2011. – P. 273–292. <https://doi.org/10.5772/21614>.
7. Cancemi S. Preliminary Analysis of Long-Term Performance of a Piping: Aging and Creep Effect / S. Cancemi, R. Frano // Materials. – 2021. – Vol. 14, iss. 7. – P. 1703. <https://doi.org/10.3390/ma14071703>.
8. Chekurin V. Amathematical model for evaluation the efficiency of gas-main pipelines in transient operational modescontechmod / V. Chekurin, Yu. Ponomaryov, O. Khymko // An international quarterly journal. – 2015. – Vol. 4, no. 3. – P. 25–32.

References:

1. Kiporenko, HS, Pakhalovych, MYe & Khoroshylov, OM 2016, 'Otsinka tekhnichnoho stanu truboprovodnykh system AES na vidpovidnist normatyvnykh parametrov', *Systemy upravlinnya, navihatsii ta zviazku*, iss. 4, pp. 146-152.
2. Kiporenko, HS & Pakhalovych, MYe 2016, 'Vdoskonalennia metodyky rozrakhunku oporu krykhkomu ruinuuvanniu truboprovodiv Pivdenno-Ukrainskoi AES', *Systemy obrobky informatsii*, iss. 7, pp. 181-184.
3. Hrinchenko, H, Trisch, R, Burdeina, V & Chelysheva, S 2019, 'Algorithm of technical diagnostics of the complicated damage to the continued resource of the circulation pipeline of the nuclear power plant', *Problems of Atomic Science and Technology, Section Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science*, no. 2 (120), pp. 104-110.
4. Kiporenko, HS 2010, 'Udoskonalennia normatyvnoho zabezpechennia ekspluatatsiinoi bezpeky truboprovodnykh atomnykh elektrostantsii', *Kand.tekh.n. abstract, Ukrainska inzhenerno-pedahohichna akademiia, Kharkiv*.
5. Cancemi, S & Frano, R 2022, 'Inverse Heat Conduction Problem in Estimating NPP Pipeline Performance', *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*, vol. 8, iss. 3, pp. 034501.
6. Taler, J, Weglowski, B, Sobota, T, Jaremkiewicz, M & Taler, D 2011, 'Inverse Space Marching Method for Determining Temperature and Stress Distributions in Pressure Components', *Developments in Heat Transfer*, Rijeka, Croatia, pp. 273-292.
7. Cancemi, S & Frano, R 2021, 'Preliminary Analysis of Long-Term Performance of a Piping: Aging and Creep Effects', *Materials*, vol. 14, iss. 7, pp. 1703.
8. Chekurin, V, Ponomaryov, Yu & Khymko, O 2015, 'Amathematical model for evaluation the efficiency of gas-main pipelines in transient operational modes', *An international quarterly journal*, vol. 4, no. 3, pp. 25-32.

Стаття надійшла до редакції 17 вересня 2022 року