

УДК 004.942

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2022.2.5>

Юлія КАЗИМИРЕНКО

доктор технічних наук, доцент, професор кафедри інформаційних управляючих систем і технологій, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, просп. Героїв України, 9, Миколаїв, Україна, індекс 54025 (u.a.kazimirenko@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-7120-8226

Ігор МІХЕЛЄВ

кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри інформаційних управляючих систем і технологій, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, просп. Героїв України, 9, Миколаїв, Україна, індекс 54025 (mihelevigor@gmail.com)

ORCID: 0000-0001-9579-6547

Микола МАТВЄЄВ

провідний інженер-конструктор, ДПНВКГ «Зоря»-«Машпроект», м. Миколаїв, Україна, індекс 54018 (mnasoft@gmail.com)

ORCID: 0000-0001-8221-1693

Yuliia KAZYMYRENKO

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at Department of Information Control Systems and Technologies, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 9 Heroes of Ukraine Avenue, Mykolaiv, Ukraine, postal code 54025 (u.a.kazimirenko@gmail.com)

Igor MYKHELIEV

Ph.D., Head of Department of Information Management Systems and Technologies, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 9 Heroes of Ukraine Avenue, Mykolaiv, Ukraine, postal code 54025 (mihelevigor@gmail.com)

Mykola MATVYEYEV

Lead of Team Engineer of GTR&DC "Zorya"- "Mashproekt", Mykolaiv, Ukraine, postal code 54018 (mnasoft@gmail.com)

Бібліографічний опис статті: Казимиренко, Ю., Міхелєв, І., Матвєєв, М. (2022). Методи і моделі візуалізації розподілу температурних полів газотурбінних камер згоряння з використанням середовища Common Lisp. *Інформаційні технології та суспільство*, 2 (4), 36–41. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2022.2.5>

Bibliographic description of the article: Kazymyrenko, Yu., Mikheliev, I., Matvyeyev, M. (2022). Metody i modeli vizualizatsii rozpodilu temperaturnykh poliv hazoturbinykh kamer zghoriannia z vykorystanniam seredovyshcha Common Lisp [Methods and models for visualization of temperature field distribution of gas turbine combustion chambers using Common Lisp]. *Informatsiini tekhnolohii ta suspilstvo – Information technology and society*, 2 (4), 36–41. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2022.2.5>

**МЕТОДИ І МОДЕЛІ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ
ГАЗОТУРБІННИХ КАМЕР ЗГОРЯННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ СЕРЕДОВИЩА COMMON LISP**

Стаття присвячена вирішенню важливої науково-практичної **проблеми** розвитку методологічного підґрунтя для роботи з багатовимірними даними експериментальних даних на машинобудівному підприємстві. **Мета роботи** – моделювання процесу з вибором інструментарію для візуалізації зображень розподілу температурних полів при стендових випробуваннях газотурбінних камер згоряння з побудовою графічних моделей за допомогою нового спеціалізованого програмного забезпечення. **Методи дослідження.** Дослідження виконано з використанням сучасних напрацювань в області комп'ютерної алгебри, теоретично-методичні засади геометричного моделювання числових рядів та власні напрацювання авторів статті. **Наукова новизна.** Для обробки результатів стендових випробувань газотурбінних камер згоряння вперше розроблено метод візуалізації зображень, який на відміну від існуючих ґрунтується на принципах алгоритмічної автоматизації побудови плоских ізотерм з вибором найкра-

цього варіанту конструктивно-компонувального рішення. **Висновки.** Проаналізовано умови проведення стендових випробувань газотурбінних камер згоряння, на підставі чого складено алгоритм обробки результатів експериментальних досліджень, який покладено в основу розробки програмного забезпечення. Розроблено геометричну інтерпретацію математичної моделі розподілу температурних полів, для чого з масиву даних виділено елементарну комірку. Фізичний смисл моделі полягатиме у тому, що з метою виключення з системи управління випадкових величин здійснюється опосереднення температур за певний інтервал часу. Модель апробовано для візуалізації розподілу температурних полів на виході з жарових труб камер згоряння. Програмне забезпечення написано на мові Common Lisp, задля виводу результатів обчислювань застосовано графічну програму Gnuplot з керуванням з консолі; графічні результати мають вигляд плоских ізотерм. Перспективи подальших досліджень пов'язано з розробкою інтерфейсу програмного застосування автоматизованих систем. Одержані результати спрямовані на покращення наукового рівня інженерно-конструкторської діяльності на машинобудівному підприємстві.

Ключові слова: візуалізація зображень, багатовимірні масиви даних, програмне забезпечення, автоматизація, плоскі ізотерми.

METHODS AND MODELS FOR VISUALIZATION OF TEMPERATURE FIELD DISTRIBUTION OF GAS TURBINE COMBUSTION CHAMBERS USING COMMON LISP

The article is devoted to the solution of an important scientific and practical problem of development of the methodological basis for work with multidimensional data of experimental data at the machine – building enterprise. **The purpose of the work** – modeling the process with the choice of tools for visualization of images of the distribution of temperature fields in bench tests of gas turbine combustion chambers with the construction of graphical models using new specialized software. **Research methods.** The research is performed using modern developments in the field of computer algebra, theoretical and methodological principles of geometric modeling of numerical series and the authors' own work. **Scientific novelty.** To process the results of bench tests of gas turbine combustion chambers for the first time has been developed a method of image visualization, which in contrast to the existing methods is based on the principles of algorithmic automation of flat isotherms with the choice of the best design solution. **Conclusions.** The conditions of bench tests of gas turbine combustion chambers have been analyzed, on the basis of which the algorithm of processing the results of experimental researches has been made, and it laid the foundation for the software development. The geometrical interpretation of the mathematical model of the distribution of temperature fields has been developed; for that purpose an elementary commensure has been selected from an array of data. The physical meaning of the model is that in order to exclude random variables from the control system, temperatures are mediated over a certain time interval. The model was tested to visualize the distribution of temperature fields at the outlet of the combustion chamber fire tubes. The software is written in the Common Lisp, to display the results of calculations a graphical program Gnuplot with console control has been used; graphical results have the form of flat isotherms. Prospects for further research are related to the development of a software application interface for automated systems. The obtained results are aimed at improving the scientific level of engineering and design activities at the machine-building enterprise.

Key words: image visualization, multidimensional data arrays, software, automation, flat isotherms.

Постановка проблеми та її зв'язок з важливими науково-практичними завданнями. Підвищення конструкторського рівня сучасних машинобудівних підприємств безпосередньо пов'язано з впровадженням нових методів роботи з багатовимірними даними, що неможливо реалізувати без відповідної інформаційної підтримки. Стендові випробування газотурбінних камер згоряння (ГКЗ) є важливим етапом дослідно-дослідницьких робіт, після якого приймаються остаточні конструктивно-компонувальні рішення. Узагальнення одержаних результатів являє собою складну інженерно-дослідницьку задачу, де крім документування та статистичної обробки даних необхідно обрати найкращий серед альтернативних варіантів. Тому розвиток науково-практичних передумов для роботи з багатовимірними масивами даних є актуальним та вимагатиме створення нових методологічних основ відбору та обробки експериментальних результатів з використанням спеціалізованого програмного забезпечення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Загальна методологія інформаційної підтримки стендових випробувань силових установок транспортних засобів, зокрема газотурбінних агрегатів, розглянута в роботі [1, с. 26–29], де особлива увага надається створенню стендів, обладнаних системами автоматизації зображень. Це натурно-випробувальні, комп'ютерно-моделюючи, натурно-комп'ютерні випробувальні стенди, для яких авторами статі розроблено програмний комплекс модельної підтримки з відповідними розрахунками у інтерактивній системі Matlab [2, с. 75–82]. Проте, не зважаючи на широкі можливості для розв'язання дослідницьких та інженерних задач високого рівня складності, має відповідні недоліки для систематизації і обробки результатів у режимі реального часу. Перед усім це пов'язано з багаторазовим повторенням обчислювальних процедур, зіставленням вхідних і вихідних даних та можливостями аналізу фізичних процесів у динаміці.

Процес проектування ГКЗ можна розглядати як задачу синтезу складної технічної системи [3, с. 180–184], розв'язання якої значно ускладнюється через нерівномірний розподіл температурних полів, чому присвячено роботи [4, с. 181–203; 5, с. 27–33]. В цих роботах для досліджень застосовуються методи математичного моделювання та числового експерименту з використанням CFD-пакетів. Одержані результати будуються за принципом «теплових карт», візуалізація надаєть-

ся у різнокольоровому вигляді, який добре сприймається фахівцями. Проте на відміну від натурних експериментів, в умовах стендових випробувань результати числового експерименту носять частковий характер та їх можна застосовувати виключно на перших етапах проектування ГКЗ. На підставі вищевикладеного слід виділити наступні проблемні питання, які вимагають вирішення задля підвищення якості конструкторських та дослідницько-довершувальних робіт на машинобудівному підприємстві, це: вибірковість та можливість корегування даних; відсів недійсних значень у відокремлених точках та осереднення одержаних експериментальних результатів; вибір графічного редактору та узагальнення зібраної інформації у вигляді, сприятливого для конструкторів. Вирішення поставленої проблематики дослідження ґрунтується на принципах наочності і побудові динамічних моделей, де результатом роботи є множина зображень [6, с. 18–33]. Математичне забезпечення процесу візуалізації даних реалізується у вигляді графів, для побудови яких, як правило, проводиться велика кількість досліджень, на підставі чого визначаються певні мітки, як це показано в роботі [7, с. 50–56]. Застосування методів комп'ютерної алгебри для розробки програмного забезпечення для візуалізації результатів розв'язання задач математичної фізики і теплофізики розглянуто авторами роботи [8, с. 165–191]. Таким чином, підвищення науково-технічного рівня проектування ГКЗ згоряння є можливим в результаті розвитку методологічного підґрунтя для роботи з багатовимірними даними стендових випробувань з подальшою візуалізацією одержаних результатів у графічному вигляді.

Мета роботи – моделювання процесу з вибором інструментарію для візуалізації зображень розподілу температурних полей при стендових випробуваннях газотурбінних камер згоряння з побудовою графічних моделей за допомогою нового спеціалізованого програмного забезпечення.

Виклад основного матеріалу. Досліджено виконано з використанням сучасних напрацювань в області комп'ютерної алгебри [9, с. 320–326], теоретично-методичних засад геометричного моделювання числових рядів з виділенням елементарної комірки [10, с. 81–89] та власні напрацювання авторів [11, с. 136–142]. Головне завдання стендових випробувань ГКЗ полягатиме у відтворенні натурних режимів складових частин з метою встановлення їх відповідності технічним вимогам. Для цього здійснюється вимірювання параметрів (палива, продуктів згоряння, потоків повітря) у контрольних точках. Отримана інформація подається у конструкторській відділ у вигляді серії графіків, таблиць, контурних діаграм температурних полей. Сформований алгоритм обробки результатів експериментальних досліджень, який далі покладено в основу створення моделі та розробки програмного забезпечення наведено на рис. 1.

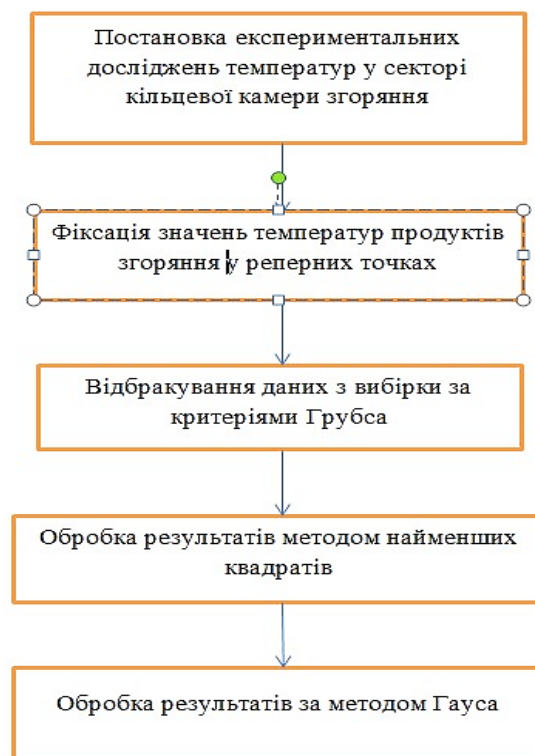


Рис. 1. Алгоритм обробки результатів експериментальних досліджень

Масив даних складається з вимічених значень температур. З метою виключення з системи управління випадкових величин здійснюється опосереднення температур за певний інтервал часу. В основу принципів відбракування точок покладено граничні умови: $t > t_{02}$, але t не повинні перевищувати очікувані значення, середньоквадратичне відхилення у кожній точці елементарної комірки (рис. 2) S не повинно перевищувати $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Під час моделювання введено припущення, що у комірки після відбракування точок методом найменших квадратів залишається менш ніж 9 опорних точок.

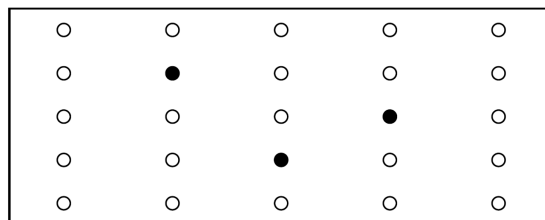


Рис. 2. Геометрична модель «виключених» точок
(чорним кольором позначено виключені точки)

Наступним етапом моделювання є побудова двовимірної поверхні розподілу температурних полів з ефектом згладжування за методом Гауса. Для розробки програмного забезпечення застосовано сучасну мову програмування Common Lisp, яка підтримує процедурну і функціональну парадигми, з можливістю поєднувати різні стилі і підходи, наприклад, об'єктно-орієнтований і функціональний [12, с. 47–51].

Для виводу результатів обчислювань застосовано вільне програмне середовище для створення дво- або тривимірних графіків – Gnuplot з керуванням консолей [10, с. 81–89]. До електронного журналу носяться час вимірювання, температура та об'ємна витрата повітря на вході в камеру згоряння, температура та витрати палива, температура повітря на виході з жарових труб. Результати представляються у вигляді контурних діаграм температурних полів – плоских ізотерм (рис. 3), за якими визначається відповідність температурних полів технічним вимогам. Побудова діаграм відбувається у вибіркового порядку, який встановлює експерт.

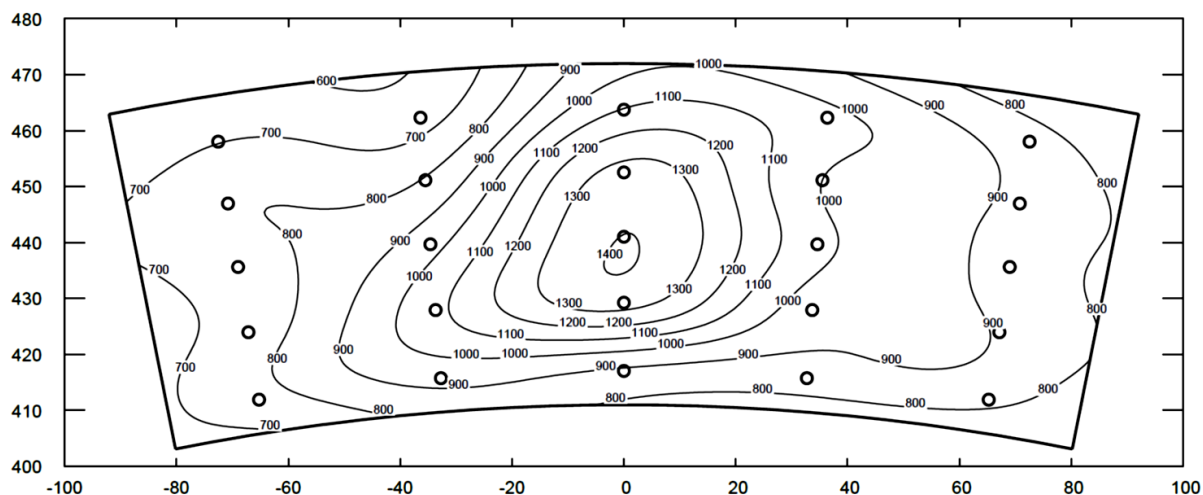


Рис. 3. Контурна діаграма температурних полів

Результати роботи спрямовані на вирішення важливої науково-практичної **проблеми** розвитку методологічного підґрунтя для роботи з багатовимірними даними експериментальних даних на машинобудівному підприємстві. **Наукова новизна** досліджень полягатиме у тому, що для обробки результатів стендових випробувань газотурбінних камер згоряння вперше розроблено метод візуалізації зображень, який на відміну від існуючих ґрунтується на принципах алгоритмічної автоматизації побудови плоских ізотерм з вибором найкращого варіанту конструктивно-компонувального рішення. **Практичне значення одержаних результатів:** одержані результати спрямовані на покращення наукового рівня інженерно-конструкторської діяльності.

Висновки. Проаналізовано умови проведення стендових випробувань газотурбінних камер згоряння, на підставі чого складено алгоритм обробки результатів експериментальних досліджень, який

покладено в основу розробки програмного забезпечення. Розроблено геометричну інтерпретацію математичної моделі розподілу температурних полів, для чого з масиву даних виділено елементарну комірку; фізичний зміст моделі полягатиме у тому, що з метою виключення з системи управління випадкових величин здійснюється опосередкування температур за певний інтервал часу. Програмне забезпечення написано на мові Common Lisp, задля виводу результатів обчислювань застосовано графічну програму Gnuplot з керуванням консолей.

Список використаних джерел:

1. Верлань А. Ф., Митько Л. О., Дячук О. А., Федорчук В. А. Методи та засоби модельної підтримки випробувальних стендів силових установок *Математичне та комп'ютерне моделювання. Сер.: Технічні науки*. 2012. Вип. 6. С. 26–29. URL: <http://dSPACE.nbuv.gov.ua/handle/123456789/47238>
2. Хоцькіна В. Б. Використання можливостей пакету Matlab для побудови імітаційних моделей. *Гірничий вісник*. 2014. Вип. 97. С. 75–82. URL: <http://ds.knu.edu.ua/jspui/handle/123456789/1145>
3. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О. Теорія технічних систем: навчальний посібник. К. : ЦП «КОМПРИНТ». 2017. 291 с. URL: <https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u132>
4. Кузьмін С. М., Грень В. М., Ляшенко В. О. Аналіз впливу конструктивних елементів основної камери згоряння авіаційного двигуна на температурне поле газів у її вихідному перерізі. *Зб. наук. праць Державного науково-дослідного інституту авіації*. 2013. Вип. 16. С. 180–184. URL: <http://www.irbis-nbuv.gov.ua>
5. Діасамідзе Б. Т., Вілкул С. В., Сербін С. І. Теоретичні дослідження двопаливної низькоемісійної камери згоряння газотурбінного двигуна. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Сер.: Енергетичні та тепло-технічні процеси й устаткування. 2019. 1. С. 27–33. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/44813>
6. Басюк Т. М. Забезпечення процесу візуалізації даних у середовищі відкритих систем. *Інформаційні системи та мережі*. 2015. Вип. 832. С. 18–33. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPICM_2015_832_5
7. Кушнерьов О. С. Про деякі застосування теорії графів. *Фізико-математична освіта*. 2015. 1 (7). С. 50–56. URL: <https://repository.sspu.edu.ua/bitstream/123456789/409/3>
8. Береславський Д. В., Коритко Ю. М., Татарінова О. А. Проектування та розробка скінченно-елементного програмного забезпечення : монографія. Харків : Вид-во «Підручник НТУ «ХПІ». 2017. 232 с. URL: <http://library.kpi.kharkov.ua/gu/node/4352>
9. Мосіюк О. О. Огляд хмарних технологій систем комп'ютерної алгебри. *Актуальні питання сучасної інформатики*. 2018. С. 320–326. URL: <http://eprints.zu.edu.ua/id/eprint/28337>
10. Корольський В. В., Шокалюк С. В., Мельниченко Ю. А. Теоретично-методичні засади геометричного моделювання числових рядів. *Фізико-математична освіта*. 2018. Вип. 4 (18). С. 81–89. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/fmo_2018_4_15
11. Казимиренко Ю. А., Михелев І. Л., Матвеев Н. А. Информационная поддержка управления процессами обработки данных при стендовых испытаниях камер сгорания судовых газотурбинных двигателей. *Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy*. 2021. № 2. С. 136–142. URL: <http://eir.nuos.edu.ua/xmlui/handle/123456789/5352>
12. Марченко О. І., Хоптинєць В. А. Трансляція програм з процедурних мов програмування у функціональній мові з використанням графу залежності даних. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*, 2015. Вип. 20. С. 47–51. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Kitonv_2015_20_10

References:

1. Verlan, A. F., Mytko, L. O., Diachuk, O. A., Fedorchuk, V. A. (2012). Metody ta zasoby modelnoi pidtrymky vyprobuvalnykh stendiv sylovykh ustanovok [Methods and tools to support model test benches propulsion]. *Matematychnе ta kompiuterne modelivannia. Ser.: Tekhnichni nauky. – Mathematical and computer modelling Series: Technical sciences*, 6, 26–29. [in Ukrainian]
2. Khot'skina, V. B. (2014). Vykorystannia mozhlyvostei paketu Matlab dlia pobudovy imitatsiinykh modelei [Using the capabilities of the Matlab package to build simulation models]. *Hirnychiy visnyk. – Mining bulletin*, 97, 75–82. [in Ukrainian]
3. Loveikin, V. S., Romasevych, Yu. O. (2017). *Teoriia tekhnichnykh system: navchalnyi posibnyk [Theory of technical systems]*. K. : TsP "KOMPRINT". [in Ukrainian]
4. Kuzmin, S. M., Hren, V. M., Liashenko, V. O. (2013). Analiz vplyvu konstruktyvnykh elementiv osnovnoi kamery zghoriannia aviatsiynoho dvyhuna na temperaturne pole haziv u yii vykhidnomu pererizi [Analysis of the influence of structural elements of the main combustion chamber of an aircraft engine on the temperature field of gases in its initial cross section]. *Zb. nauk. prats Derzhavnoho nauково-doslidnoho instytutu aviatsii. – Collection of scientific works State Research Institute of Aviation*, 16, 180–184. [in Ukrainian]
5. Diasamidze, B. T., Vilkul, S. V., Serbin, S. I. (2019). Teoretychni doslidzhennia dvopalyvnoi nyzkoemisiianoi kamery zghoriannia hazoturbinnoho dvyhuna [Theoretical investigations of a dual-fuel low-emission gas turbine combustor]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Ser.: Enerhetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustatkuvannia. – Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser.: Power and Heat Engineering Processes and Equipment* 1, 27–33. [in Ukrainian]
6. Basiuk, T. M. (2015) Zabezpechennia protsesu vizualizatsii danykh u seredovishchi vidkrytykh system [Providing of process of visualization of data is in the environment of open system]. *Informatsiini systemy ta merezhi. – Information systems and networks*, 832, 18–33. [in Ukrainian]
7. Kushnerov, O. S. (2015). Pro deiaki zastosuvannia teorii hrafiv [On some applications of graph theory]. *Fizyko-matematychna osvita. – Physical and mathematical education*, 1 (7), 50–56. [in Ukrainian]

8. Bereslavskiy, D. V., Korytko, Yu. M., Tatarinova, O. A. (2017). *Proektuvannia ta rozrobka skinchenno-elementnoho prohramnoho zabezpechennia [Design and development of finite element software]*. Kharkiv : Textbook of NTU "KhPI". [in Ukrainian]
9. Mosiuk, O. O. (2018). Ohliad khmarnykh tekhnolohii system kompiuternoi alhebry [An overview of cloud technologies in computer algebra systems]. *Aktualni pytannia suchasnoi informatyky. – Current issues of modern computer science*, 320–326. [in Ukrainian]
10. Korolskyi, V. V., Shokaliuk, S. V., Melnychenko, Yu. A. (2018). Teoretychno-metodychni zasady heometrychnoho modeliuвання chyslovykh riadiv [Theoretical and methodological principles of geometric modeling of numerical series]. *Fyzyko-matematychna osvita. – Physical and mathematical education*, 4 (18), 81–89. [in Ukrainian]
11. Kazymyrenko, Yu. A., Mykhelev, Y. L., Matveev, N. A. (2021). Informacionnaya podderzhka upravleniya processami obrabotki dannykh pri stendovykh ispytaniyah kamer sgoraniya sudovykh gazoturbinykh dvigatelej [Information support managing data processing during stand tests of combustion chambers of ship gas turbine engines] *Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy. – Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy*. 2, 136–142. [in Azerbaijan]
12. Marchenko, O. I., Khoptynets, V. A. (2015). Transliatsiia prohram z protsedurnykh mov prohramuvannia u funktsionalnii movi z vykorystanniam hrafu zalezhnosti danykh [Translation of programs from procedural programming languages in a functional language using a graph of data dependence]. *Kompiuterno-intehrovani tekhnolohii: osvita, nauka, vyrobnytstvo. – Computer-integrated technologies: education, science, production*, 20, 47–51. [in Ukrainian]