

УДК 532. 536.2. 621

В. В. КОРОБКО, О. О. МОСКОВКО*Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна*

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСІВ ЗАПУСКУ ТЕРМОАКУСТИЧНИХ ДВИГУНІВ ЗА УМОВ ВИКОРИСТАННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

В статті розглянуто питання, пов'язані зі створенням термоакустичних систем, призначених для утилізації низькотемпературних теплових ресурсів. Аналіз попередніх досліджень показав, що в деяких випадках в термоакустичних двигунах має місце велика різниця між температурою джерела теплової енергії та температурою робочого тіла. Це є небажаним явищем для будь якої теплової машини, оскільки зумовлює втрату загальної ефективності. В зв'язку з цим було вирішено провести серію дослідів процесів, які мають місце в термоакустичних двигунах під час їх запуску. В статті наведено результати цих експериментальних досліджень. Встановлено, що можливі умови, коли теплообмінники не здатні забезпечити потрібний тепловий потік і це є лімітуючим фактором для потужності термоакустичних теплових машин. Експерименти також показали, що для самочинного старту термоакустичних коливань повздовжній температурний градієнт в матриці не є єдиною та достатньою умовою. Результати дослідів дозволяють запропонувати ряд рішень, спрямованих на підвищення ефективності низькотемпературних термоакустичних теплових машин.

Ключові слова: термоакустика, тепла машина, двигун, теплообмін, акустика, теплообмінник, матриця, резонатор.

Вступ

Робота будь яких теплових двигунів пов'язана з продукуванням вторинних теплових викидів. Одночасно існує загальна тенденція, коли підвищення ефективності таких двигунів веде до зменшення температурного рівню цих викидів. Можна стверджувати, що існує певний брак теплових машин (ТМ), які здатні ефективно використовувати саме низькопотенційні вторинні та відновлювальні теплові ресурси. Термоакустичні апарати (ТАА) – двигуни (ТАД) і рефрижератори, можуть стати в нагоді для вирішення цієї проблеми. Потенційні можливості термоакустичних теплових машин (ТАТМ) дають змогу створювати ефективні рішення в різних галузях – енергетиці, кліматичних системах, транспорті, кріотехніці. Проте, широкому впровадженню ТАТМ заважають їх мала питома потужність, складність безпосереднього отримання механічної роботи, малий досвід практичного використання.

Мета роботи. Суттєва відмінність ТАТМ від звичайних систем полягає в тому, що в термоакустиці теплообмін є єдиним механізмом як для підводу теплоти до робочого тіла, так і для процесу перетворення теплової енергії в механічну у вигляді потужних акустичних коливань робочого середовища в порожнині резонатора. Забезпечення умов для максимально інтенсивного теплообміну між елементами ТАТМ є неодмінною умовою для створення ефективних ТАА. Використання низькотемпературних

теплових ресурсів створює додаткові труднощі для забезпечення потрібних теплових потоків в ТАТМ. Наявні дослідження спрямовані на вивчення комплексу факторів, які визначають інтенсивність теплообміну в ТАА та пошуку раціональних шляхів підвищення загальної їх ефективності.

1. Аналіз досліджень та публікацій

Відомо, що основою будь якої ТАТМ є теплообмінний вузол, який складається з нагрівача, охолоджувача та розташованої між ними пористої матриці (рис 1) [1].

Завдяки теплообмінникам в матриці формується повздовжній градієнт температури. При досягненні певних значень цього градієнту в резонаторі самочинно виникають акустичні коливання і, оскільки система є резонансною, ці пульсації набувають значної інтенсивності.

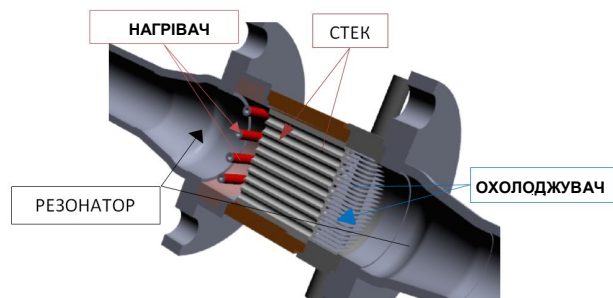


Рис. 1. Загальна схема термоакустичного апарату

Базові принципи теорії ТАТМ започаткували N. Rott та P. Ceperley [2, 3], в подальшому ці положення були розвинені S. Backhaus, G. Swift та S. L. Garrett в [1, 4, 5]. В чисельних роботах детально розглядалися питання теорії ТАТМ, їх конструктивних особливостей, можливих шляхів практичного використання [1, 5-8]. В [9, 10] показано, що на роботу ТАД великий вплив оказують процеси теплообміну між основними структурними частинами ТАА - стеком (матрицею) та теплообмінниками.

Переважає більшість досліджень присвячена вивченню робочих процесів в ТАД на сталих робочих режимах. Найчастіше в експериментальних ТАД використовуються відкриті електричні нагрівачі або пальники. При цьому максимальні температури робочого тіла та поверхонь теплообмінників сягають рівню 600 - 900 °C та вище. Значно менша кількість робіт пов'язана з вивченням роботи низькотемпературних ТАД з робочими температурами у 200 - 400 °C.

Не зважаючи на відмінності у конструкції різних ТАД та на максимальний температурний рівень, існують спільні закономірності у характері протікання робочих процесів. Так, різними дослідниками було показано, що з моменту запуску ТАД, коли в резонаторі виникають акустичні пульсації, відбувається зниження температур нагрівача, матриці та робочого тіла (рис. 2) [7, 8]. В деяких випадках, ці явища не дуже помітні (рис. 2, а), але є приклади, коли падіння температур поверхонь теплообмінників, матриці та робочого тіла є досить суттєвим (рис. 2, б).

Тобто, маючи джерело теплової енергії з температурою у 450°C, наявний ТАД починає працювати у сталому режимі з максимальною температурою робочого тіла, яка не перевищує 250°C, що неодмінно знижує ефективність ТАД. Зрозуміло, що для

випадку утилізації низькотемпературних теплових ресурсів такі явища є абсолютно неприйнятними.

2. Постановка задачі дослідження

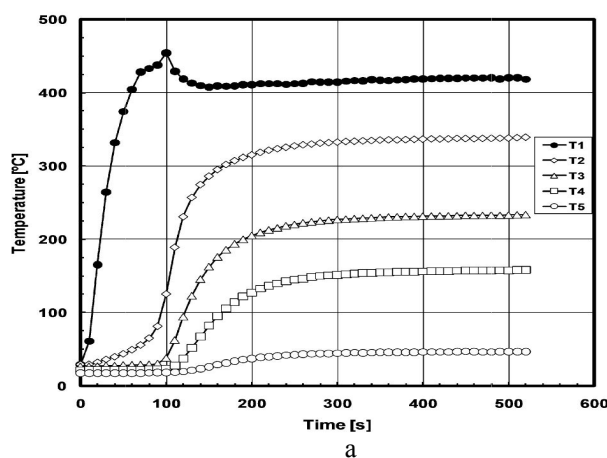
Маючи за мету розробку ТАТМ, призначених для використання низькотемпературних джерел теплової енергії, авторами вирішено провести серію експериментальних досліджень явищ, які мають місце в ТАД під час його запуску.

Перший етап експериментів спрямовано на дослідження процесів в ТАД під час розігріву, запуску та виходу на сталий режим роботи. Основна увага приділялася реєстрації температурних флуктуацій робочого тіла, поверхонь теплообмінників та матриці. В якості об'єкту досліджень було обрано ТАД, який працює в режимі «стоячої» хвилі, реалізуючи термодинамічний цикл Брайтона.

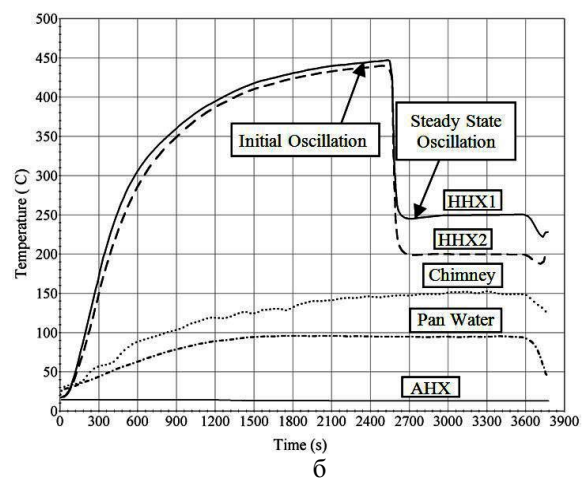
Експерименти проводились з використанням дослідного стенду, який оснащено комп'ютеризованою контрольно-вимірювальною системою [10, 11]. Схема розташування термодатчиків в дослідному ТАД показана на рис. 3.

Планом досліджень було передбачено вивчення впливу низької конструктивних особливостей на робочі характеристики ТАД, а саме:

- визначити залежність пускових якостей ТАД від параметрів нагрівача;
- отримати інформацію відносно коливань температур основних елементів ТАД;
- перевірити ефективність різних типів теплообмінних поверхонь в умовах пульсуючого середовища;
- провести аналіз експериментальної інформації з метою пошуку можливих шляхів зменшення мінімальної температури запуску ТАД.



а



б

Рис. 2. Типовий вигляд температурних трендів основних елементів ТАД:
а – дослідний зразок ТАД [7], б – ТАД проект SCORE [8]

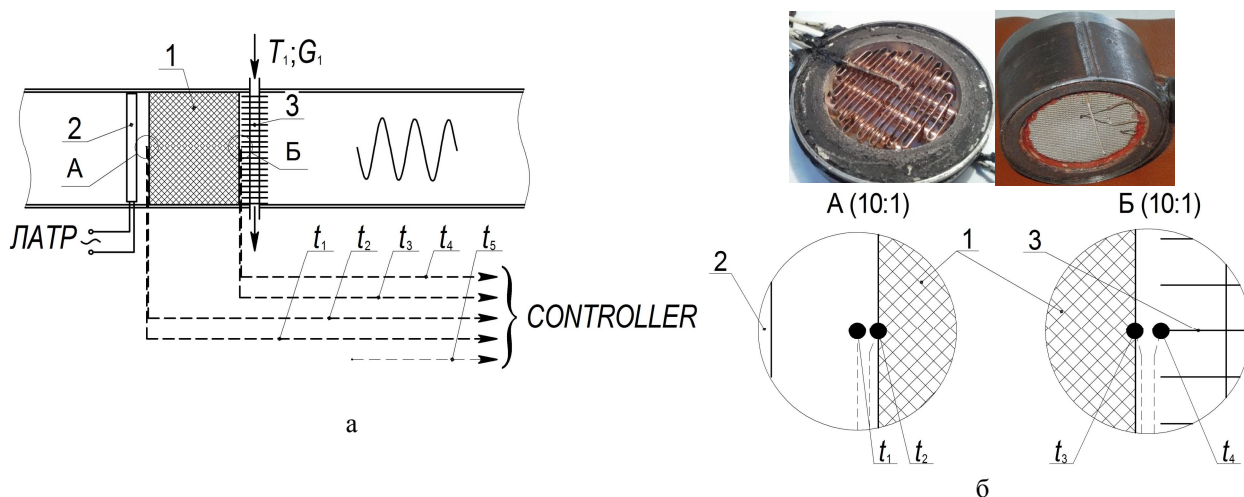


Рис. 3. Схема розташування термопар на експериментальній установці:
1 – стек; 2 – нагрівач; 3 – охолоджувач

3. Аналіз результатів досліджень

В ході першого етапу дослідів єдиним параметром, який змінювався була потужність електричного нагрівача – P_{hit} . Результати цих експериментальних досліджень показані на рис. 4 у вигляді температурних трендів основних елементів ТАД та в таблиці 1.

Момент запуску ТАД визначався за показниками датчиків акустичного тиску та за зміною характеру лінії тренду температури стеку.

Теплообмінники ТАД (нагрівач та охолоджувач) мають підтримувати максимально можливий повздовжній градієнт температури на стеку, забезпечуючи максимальну потужність ТАД. В момент старту ТАД відбувається практично синхронна зміна кривизни температурних трендів нагрівача, робочого середовища та поверхні матриці, що можна бачити на графіках. Аналізуючи наведені результати можна стверджувати, що в момент запуску ТАД відбуваються різкі зміни характеру температурних трендів.

Таблиця 1

Вплив потужності нагрівача на параметри запуску ТАД

P_{heat} , Вт	ΔT_{onset} °C/мм	ΔT_{work} °C/мм	τ_{onset} , сек	t_{start} °C
125	2,7	4,3	87	160
80	3,1	4,1	150	180
54	3,5	3,9	330	200
40	$\Delta T_{stack} \approx 3,5$	–	–	–

Отже має місце стрімке зростання температури матриці при одночасному зниженні температур поверхні нагрівача та робочого тіла. Слід відмітити,

що ці явища більш виражені при високих рівнях підведеної потужності – P_{heat} .

Пояснити такий ефект можна припустивши невідповідність теплової продуктивності нагрівача потенціальній енергоємності матриці та зміною механізмів, що впливають на інтенсивність теплообміну. В умовах пульсуючого руху робочого середовища теплообмін забезпечують різні механізми – конвекція, випромінювання, теплопровідність. Роль кожної складової змінюється в процесі запуску ТАД [9, 10].

Таким чином, за умов обмеження максимальної температури теплообмінників підвищення їх теплової продуктивності є складною задачею, яка потребує розробки спеціальних методів.

Крім того потужність нагрівача суттєво впливає на пускові якості ТАД, зростання P_{hit} скорочує час, потрібний для початку термоакустичних пульсацій, при одночасному зменшенні величини стартового температурного градієнту – ΔT_{onset} . За умов різкого розігріву стеку локальний повздовжній температурний градієнт ΔT_{onset} на момент старту ТАД суттєво менший, ніж на сталому робочому режимі ΔT_{work} . Цей факт підтверджує припущення про важливу роль термоконвекційних течій та гідродинамічної нестабільності в процесі самочинного виникнення термоакустичних пульсацій в каналах матриці.

Більш того, коли потужність нагрівача була зменшена до 40 Вт старт ТАД не відбувся, не зважаючи на те, що досягнутий температурний градієнт – ΔT_{stack} перевищив значення потрібні для виникнення термоакустичних пульсацій ($\Delta T_{stack} \geq 3,6$). Тобто, температурний градієнт ΔT_{onset} не є єдиним фактором, який визначає якості ТАД, що суперечить загально визнаній теорії [1].

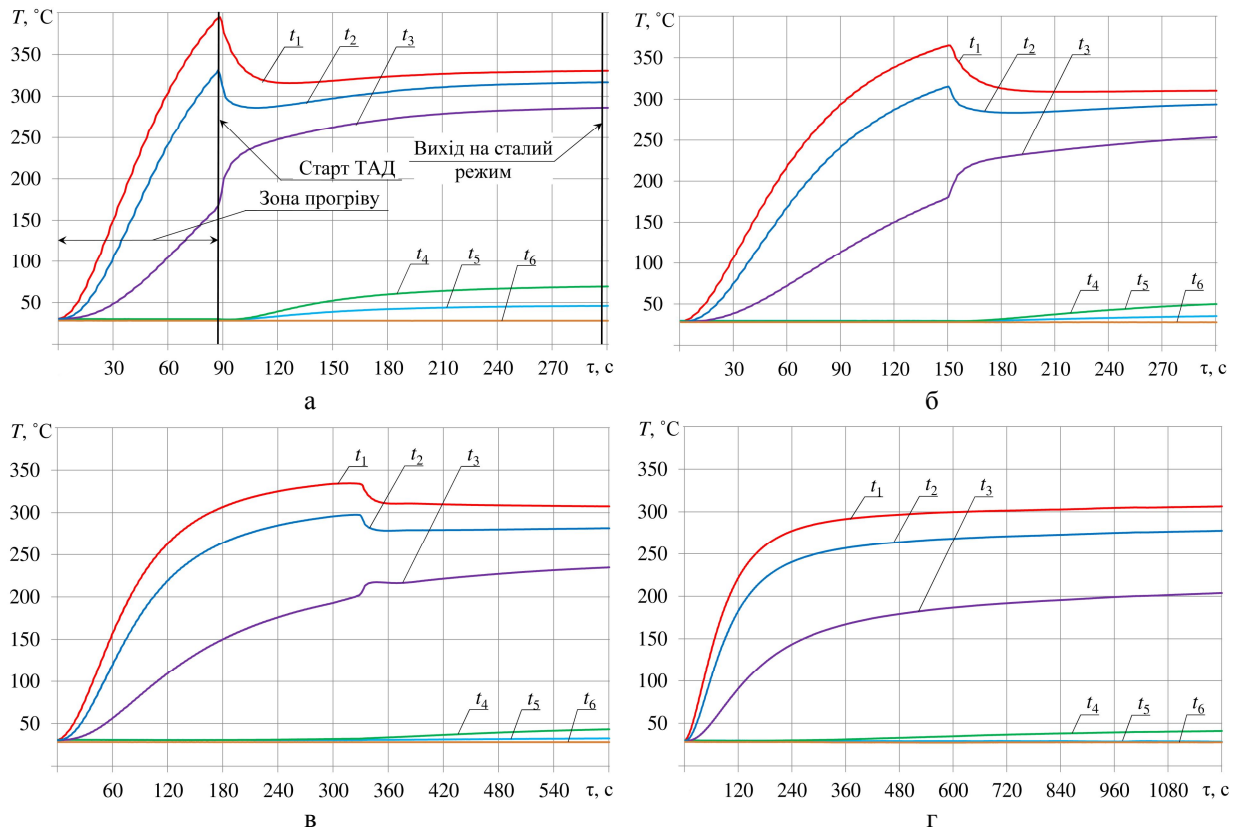


Рис. 4. Температурні тренди основних елементів ТАД під час запуску:

а – потужність нагрівача 125 Вт; б – потужність нагрівача 80 Вт;

в – потужність нагрівача 54 Вт; г – потужність нагрівача 40 Вт

Отже, пошук раціональних шляхів інтенсифікації теплообміну в умовах пульсуючого середовища є важливою задачею для створення ефективних конструкцій ТАТМ.

Висновок

1. Невідповідність теплової продуктивності нагрівача та потенційної енергоємності матриці створює передумови зниження ефективності ТАТМ.

2. Раціональна інтенсифікація процесів теплопереносу є необхідною умовою для вдосконалення ТАТМ.

3. Температурний градієнт в матриці ΔT_{onset} не є єдиним фактором, який визначає умови для запуску ТАД. Важливим є не тільки максимальні значення температури елементів, але і швидкість її зростання. Для надійного запуску ТАД слід забезпечити умови для різкого розігріву нагрівача та матриці.

Література

1. Swift, G. W. *Thermoacoustic: A unifying perspective for some engines and refrigerators* [Text] / G. W. Swift. – American Institute of Physics, 2002. – 300 p.

2. Rott, N. *Damped and thermally driven acoustic oscillations in wide and narrow tubes* [Text] / N. Rott // *Journal of Applied Mathematics and Physics*. – 1969. – № 20. – P. 230–243.

3. Ceperley, P. H. *A pistonless stirling engine - the traveling wave heat engine* [Text] / P. H. Ceperley // *Journal of Acoustical Society of America*. – 1979. – № 66. – P. 1508.

4. Backhaus, S. *A thermoacoustic-Stirling heat engine: Detailed study* [Text] / S. Backhaus, G. Swift // *J. Acoustic. Soc. Am.* – 2000. – № 107. – P. 3148–3166.

5. Garrett, S. L. *Thermoacoustic engines and refrigerators* [Text] / S. L. Garrett // *American Journal of Physics*. – 2004. – Vol. 72. – P. 11–17.

6. Bruneau *Asymptotic theory of nonlinear acoustic waves in a thermoacoustic prime-mover* [Text] / V. Gusev, H. Bailliet, P. Lotton, M. Bruneau // *Acustica*. – 2000. – Vol. 86. – P. 25–38.

7. Yu, Z. *Experimental testing of the flow resistance and thermal conductivity of porous materials for regenerators* [Text] / Z. Yu, F. A. Z. Saat, A. J. Jaworski // *Proceedings of 23rd IIR International Congress of Refrigeration*. – 2011. – Vol. 32. – P. 217–228.

8. *Development and Assessment of Thermoacoustic Generators Operating by Waste Heat from Cooking Stove* [Text] / B. Chen, A. A. Yousif, P. H. Riley, D. B. Hann // *Engineering*. – 2012. – № 4. – P. 894–902.

9. Коробко, В. В. Исследование факторов, влияющих на эффективность термоакустических аппаратов [Текст] / В. В. Коробко // Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу: матер. 4-ї Міжнар. наук. конф. – Дніпропетровськ : ДНУ, 2012. – С. 56-59.

10. Коробко, В. В. Исследование процессов теплообмена и гидродинамики в элементах термоакустических двигателей [Текст] / В. В. Коробко // Ави-

ационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 8 (105). – С. 123-130.

11. Kondratenko, Y. Multisensor data acquisition system for thermoacoustic processes analysis [Text] / Y. Kondratenko, V. Korobko, O. Korobko // Proceedings of the 6th IEEE international conference Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems IDAACS'2011. – Prague, 2011. – Vol. 1. – P. 54-58.

Поступила в редакцию 31.05.2014, рассмотрена на редколлегии 14.06.2014

Рецензент : д-р техн. наук, проф., зав. каф. двигунів внутрішнього згорання Б. Г. Тимошевський, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв.

ОСОБЕННОСТИ ЗАПУСКА ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

В. В. Коробко, А. А. Московко

В статье рассмотрены вопросы, связанные с созданием термоакустических систем, предназначенных для утилизации низкотемпературных тепловых ресурсов. Анализ предыдущих исследований показал, что в некоторых случаях в термоакустических двигателях имеет место большая разница между температурой источника тепловой энергии и температурой рабочего тела. Это нежелательно для любой тепловой машины, поскольку приводит к потере общей эффективности. В связи с этим было решено провести экспериментальные исследования процессов, имеющих место в термоакустических двигателях при их запуске. В статье приведены результаты этих экспериментальных исследований. Установлено, что возможны условия, когда теплообменники не способны обеспечить нужный тепловой поток и это является лимитирующим фактором для мощности термоакустических тепловых машин. Эксперименты показали, что для самопроизвольного старта термоакустических колебаний продольный температурный градиент в матрице не является единственным и достаточным условием. Результаты работы позволяют предложить ряд решений, направленных на повышение эффективности низкотемпературных термоакустических тепловых машин.

Ключевые слова: термоакустика, тепловая машина, двигатель, теплообмен, акустика, теплообменник, матрица, резонатор.

FEATURES START THERMOACOUSTIC ENGINE UNDER CONDITIONS USING LOW-TEMPERATURE THERMAL ENERGY SOURCE

V. V. Korobko, A. A. Moskovko

The article discusses issues related to the creation of thermoacoustic systems designed for the utilization of low-temperature heat resources. Analysis of previous studies have shown that in some cases in thermoacoustic engines there is a big difference between the temperature of thermal energy of the source and the temperature of the working substance. This is undesirable for any heat engine, as it leads to the loss of overall efficiency. In this regard, it was decided to carry out experimental studies of processes that are taking place in thermoacoustic engines. The results of these experimental studies are shown and discussed in the article. Experiments revealed the possible conditions when heat exchangers are not able to provide the desired heat flux and this is a limiting factor for the power of thermoacoustic heat engines. Experiments have shown that the spontaneous start of thermoacoustic oscillations longitudinal temperature gradient in the matrix is not the only sufficient condition. The results allow us to offer a number of solutions to improve the efficiency of low-temperature thermoacoustic heat engines.

Keywords: thermoacoustic, heat engine, heat transfer, acoustics, heat exchanger, matrix, resonator.

Коробко Володимир Владиславович – канд. техн. наук, доцент кафедри суднових та стаціонарних енергетичних установок, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: volodymyr.korobko@nuos.edu.ua, kvv001@gmail.com.

Московко Олексій Олексійович – аспірант, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: oleksiy.moskovko@nuos.edu.ua.