

УДК 621.892.84

DOI: 10.18372/0370-2197.2(99).17627

І. В. МАЛЯРЧУК

Національний авіаційний університет, Україна

ВПЛИВ МОДИФІКАТОРІВ ТЕРТЯ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Проведено аналіз антифрикційних та протизношувальних добавок до мастильних матеріалів та розглянуто механізми утворення захисних плівок на елементах трибосполучення.

Ключові слова: *зношування, ремонтно-відновлювальний склад, графіт, дисульфід молібдену, коефіцієнт тертя.*

Вступ та постановка задач дослідження. Однією з проблем, пов'язаних із тертям при експлуатації машин, є знос деталей, тому актуальним постає питання створення засобів та технологій формування поверхонь з оптимальними триботехнічними та міцністними властивостями рухомих з'єднань. Оскільки процес тертя усунути неможливо, так як він пов'язаний з рухом тіла і з перетворенням механічної енергії в інші її види, перспективним напрямом при збільшенні ресурсу технічних систем являється підвищення зносостійкості матеріалу поверхні тертя [1]. Однак, підвищення зносостійкості в більшості випадків пов'язано зі значними виробничими витратами, а при експлуатації машин є проблематичним процесом. Якщо у зону посиленого зношування ввести спеціальний матеріал, то енергія руйнування перетворюється на енергію утворення нових структур з цим матеріалом, що призведе до відновлення слідів зносу в процесі експлуатації трибосистеми та забезпечить подовження терміну роботи механізму машини [2, 3]. Такими спеціальними матеріалами, відомими в даний час, є: мастильні матеріали з додаванням добавок, полімерні склади та металокерамічні спеціальні ремонтно-відновлювальні склади (РВС).

Метою роботи є аналіз антифрикційних добавок, їх фізико-хімічних характеристик та можливостей використання модифікаторів тертя..

Порівняльний аналіз антифрикційних та протизношувальних добавок до мастильних матеріалів. Графітові мастильні матеріали - всі мастильні матеріали, у складі яких є графіт. Він може виступати в ролі добавок або у вигляді порошку використовуватися як самостійний матеріал. Часто можна зустріти графітове мастило у вигляді рідких масляних дисперсій – їх формула не передбачає використання загущувача. Додавання графіту до складу мастильних матеріалів надає їм додаткові поліпшені властивості, дозволяючи краще утримуватися в зоні тертя і протистояти високим навантаженням. Оптимальні результати отримали при введенні 5 % графіту. Встановлено, що утворена плівка мастильного матеріалу з графітом призводить до зниження коефіцієнту тертя, швидкості зношування, що зумовлено можливою динамічною рівновагою між перенесенням і відшаруванням продуктів тертя [4] (рис. 1).

Мастильні матеріали з графітом мають наступні характеристики: підвищена несуча здатність; поліпшені антифрикційні властивості; водостійкість; відмінна адгезія; антистатичні властивості; гарне поєднання ефективності і вартості.

До недоліків можна віднести те, що графіт має високу електропровідність. При достатньо високій концентрації графіту в мастильному матеріалі, останній

також може проявляти електропровідні властивості. До недоліків мастильних матеріалів з дисперсним графітом можна додати також обмеження на використання у високошвидкісних механізмах і вузлах з високою точністю виготовлення деталей. У цих випадках частинки графіту порушують геометрію контакту, що призводить до прискореного зносу деталей [5].

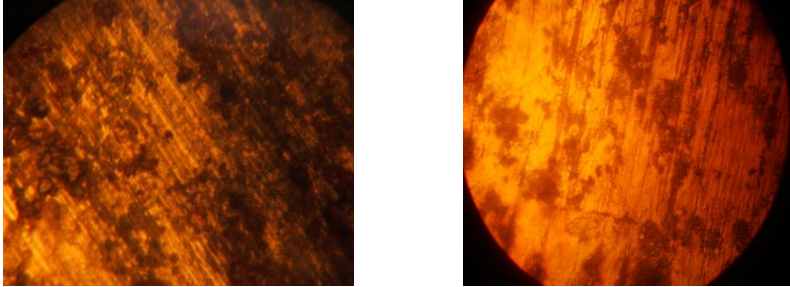


Рис. 1. Поверхня сталі 45 після напрацювання 3000 циклів при змащуванні трансмісійною оливою ТАД-17і з 1% графіту.

Дисульфід молібдену (MoS_2) – неорганічна бінарна хімічна сполука чотиривалентного молібдену з двовалентною сіркою. Дисульфід молібдену являє собою важкий сіро-блакитний або зеленувато-чорний кристалічний порошок, жирний на дотик (як графіт), твердість 1-1,5 за шкалою Мооса. MoS_2 з розміром частинок в діапазоні 1-100 мкм є сухою змащувальною речовиною, яка проявляє високі мастильні та стабільні властивості до температур 350 °С в окисних середовищах, а також у вакуумі. При випробуванні MoS_2 з використанням трибометра при низьких навантаженнях (0,1-2 Н) одержані значення коефіцієнта тертя менше 0,1 [6, 7].

Дисульфід молібдену часто є компонентом сумішей та композиційних матеріалів з низьким коефіцієнтом тертя. Такі матеріали використовуються в високонадійних механізмах, наприклад, в авіаційних двигунах. Дисульфід молібдена використовують також в якості армуючої добавки до полімерних матеріалів. При додаванні до пластмаси MoS_2 формує композиційний матеріал з покращеною міцністю та ефективними антифрикційними характеристиками. Були розроблені самозмазуючі композиційні покриття для високотемпературних конструкцій, що складаються з дисульфиду молібдену і нітриду титану за допомогою CVD-технології [8].

Фулерени. Вперше можливість існування високо симетричної молекули вуглецю, яка нагадує футбольний м'яч, була передвіщена японськими вченими Е. Осава і З. Йошида у 1979 р. Надалі Д.А. Бочвар і Е.Г. Гальперн зробили перші теоретичні квантово хімічні розрахунки такої молекули і довели її стабільність. Але тільки 15 років потому (1985 р.) англійському вченому Г. Крото із співробітниками вдалося синтезувати молекулу фулерену C_{60} .

Фулереном називають замкнені молекули C_{60} , C_{70} , C_{76} , C_{84} , в яких всі атоми вуглецю знаходяться на сферичній чи сфероїдальній поверхні. Центральне місце серед фулеренів займає молекула C_{60} , яка характеризується високою симетрією і високою стабільністю. Структурно кластер C_{60} являє собою усічений ікосаедр з атомами вуглецю в кожній вершині, які утворюють по три зв'язки один з одним. Поверхня молекули складається з 12 правильних пентагонів (зі стороною а) і 20 викривлених гексагонів (зі сторонами а і в). Сторона а є спільною для п'яти- і

шестичленних циклів, сторона в – спільна для двох шестичленних циклів. Ці зв'язки називають відповідно «одинарними» і «подвійними»[10,11].

Особливості будови фулеренів обумовлюють їх унікальні властивості. C_{60} має високу пружність і міцність. Фулерени мають високу електронегативність, в хімічних реакціях виступають як сильні оксиданти і здатні приєднувати до шести вільних електронів. Відомо, що більше третини елементів періодичної системи можуть бути розміщеними в середині молекули C_{60} . Фулерени практично не розчиняються в полярних розчинах типу спиртів, в ацетоні, і слабборозчинні в нормальних алканах (пентан, гексан, декан). Краще всього вони розчиняються в рідинах, для яких відношення питомої ентальпії випаровування до питомого об'єму молекули розчинника близько до відповідного значення для молекули C_{60} (100 кал / $см^3$).

Збільшення кількості агрегатів (кластерів і міцел) в об'ємі мастильного матеріалу збільшує сумарну напруженість електростатичного поля мастильної плівки Еж, яка формується під впливом електростатичного поля поверхні тертя Еп (рис. 2).

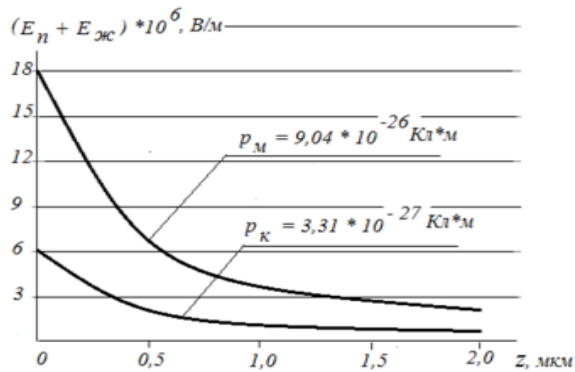


Рис. 2. Залежності зміни напруженості електростатичного поля в мастильній плівці від кількості агрегатів та відстані від поверхні тертя

При цьому, застосовуючи «розчинник» для фулеренів у вигляді високомолекулярних кислот, можна домогтися збільшення кількості агрегатів більш ніж на порядок. Пояснюється це тим, що при застосуванні «розчинника» молекули фулерену меншою мірою утворюють у мастильному матеріалі кластери, а починають активно утворювати міцели, що доведено у роботі [10]. Ядром міцели виступає одинична молекула фулерену або кластер з декількох молекул фулеренів з приєднаними до ядра полярними молекулами високомолекулярної кислоти, наприклад, олеїнової. Залежності зміни сумарної напруженості електростатичного поля у мастильній плівці від величини дипольного моменту агрегатів та відстані від поверхні тертя представлені на рис. 3.

З поданих залежностей випливає, що чим вище дипольний момент агрегатів, тим більша величина сумарної напруженості електростатичного поля в масляному об'ємі плівки. Даний ефект позитивно впливає на формування структури мастильної плівки на поверхні тертя і на зносостійкість трибосистеми. Збільшенню дипольного моменту агрегатів сприяє формування міцел. Таким шляхом можна підвищити якість мастильного матеріалу, застосовуючи «розчинник» фулеренів з наступним введенням у мастильний матеріал [10, 11].

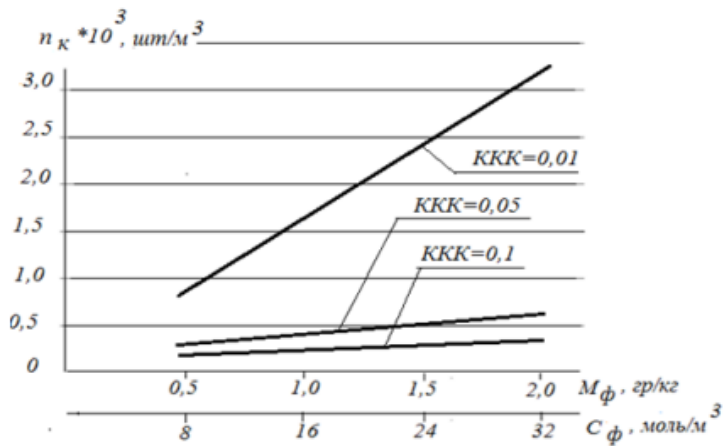


Рис. 3. Залежність зміни кількості кластерів від концентрації фулеренів в розчині та критичної концентрації кластероутворення

Вуглецеві нанотрубки являють собою протяжні структури у вигляді порожнього циліндру, які складаються із одного чи декількох згорнутих в трубку графітових шарів з гексагональною організацією вуглецевих атомів (рис. 4).

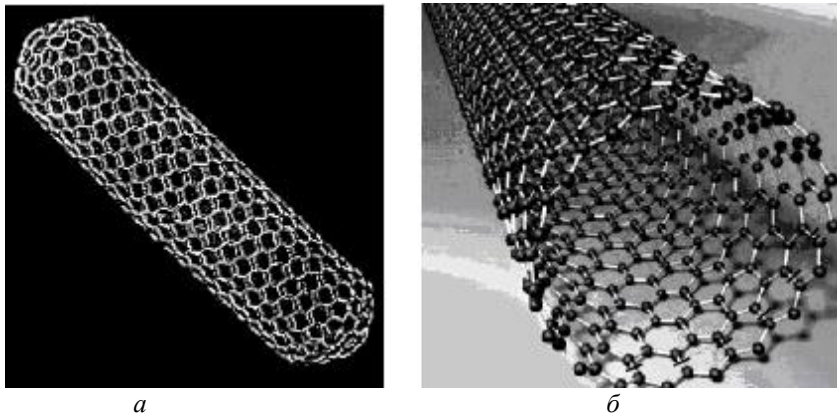


Рис. 4. Схематичне зображення вуглецевої нанотрубки (а) і розташування атомів на її поверхні (б)

Вуглецеві нанотрубки як нова алотропна форма вуглецю були відкриті японським фізиком С. Іджима у 1991 р.

Діаметр вуглецевих нанотрубок складає 1...150 нм, а довжина вимірюється десятками і сотнями мікрометрів та постійно зростає з удосконаленням технології їх отримання.

На поверхні трубки атоми вуглецю розташовані у вершинах правильних шестикутників. Кінці трубки закриті за допомогою шести п'ятикутників. Фактично нанотрубки можна представити як лист графіту, який згорнутий у безшовний циліндр. Основним елементом вуглецевих нанотрубок є згорнутий в циліндр графеновий лист, тобто моношар, який викладений правильними шестикутниками, у вершинах яких розташовані атоми вуглецю. За кількістю шарів, які утворюють нанотрубку, розрізняють одностінні та багатостінні нанотрубки [12].

Дослідження за допомогою електронної мікроскопії показують, що більшість нанотрубок складається із декількох графенових шарів – вкладених один в одний або накручених на одну вісь. Відстань між сусідніми графеновими шарами приблизно дорівнює 0,34 нм, тобто відстані між сусідніми площинами кристалічного графіту. На практиці ця відстань спотворюється через вплив сусідніх нанотрубок. Наявність дефектів призводить до спотворення прямолінійної форми нанотрубки. Ще один тип дефектів багат шарових нанотрубок пов'язаний з впровадженням в поверхню, яка складається із правильних шестикутників, деякої кількості п'ятикутників та семикутників. Це приводить до порушення циліндричної форми, причому впровадження п'ятикутника викликає опуклий вигин, а впровадження семикутника – виникнення увігнутого вигину. Таким чином, подібні дефекти обумовлюють появу зігнутих та спіралевидних нанотрубок. Різні структурні характеристики вуглецевих нанотрубок повинні призводити до відмінностей в електронній структурі даних об'єктів.

Додавання нанотрубок в різні види мастил дозволяє суттєво підвищити зносостійкість, міцність і тріщиностійкість. Нанотрубки також використовують при розробці нових мастил і охолоджуючих сумішей, для підвищення ресурсу механічних вузлів тертя транспортних систем. Вуглецеві нанотрубки мають значні емісійні властивості при невисоких електричних полях. Вони проявили себе як джерела інтенсивної автоелектронної емісії [12].

Металокерамічні ремонтно-відновлювальні склади (РВС). Новим напрямом в автохімії та трибології є «геотрибологія». Термін включає поняття трьох процесів – тертя, знос і змащування шаруватими серпентинітовими мінералами та сполуками геологічного походження, що мають мікро- та нанорозміри. На основі цих матеріалів створюються спеціальні добавки в мастильні матеріали. Ці добавки можуть вступати у взаємодію з металом поверхонь тертя і формувати на них металокерамічний захисний шар, який відновлює зношену поверхню [4, 9].

За хімічним і фазовим складом РВС являє собою класичний магнезійно-залістий силікат (серпентин), що є формою цілого ряду мінеральних руд класу олівінів, кінцевими фазами якого є форстерит (Mg_2SiO_4) і (Fe_2SiO_4) . Відновлення та зміцнення рухомих сполук, за описом розробників металокерамічних матеріалів здійснюється за рахунок формування на поверхнях тертя структур підвищеної міцності, підвищення термодинамічної стійкості системи поверхня тертя – мастильний матеріал. Поверхнево-активні речовини металокерамічного відновника, після введення в трибосистему хімічно (каталіз) і фізично (суперфініш) очищають поверхні тертя від оксидів та відкладень, які утворюються в процесі експлуатації. При терті створюються умови утворення ювенільної поверхні, що спричинює утворення металевого зв'язку частинок складу РВС з поверхнею деталей (рис. 5). Поступово на поверхнях тертя формується металокерамічне покриття, що частково відновлює дефекти поверхні тертя, і має високі антифрикційні та протизношувальні властивості [3, 4].

При застосуванні складів РВС недоліком утвореного відновлювального поверхневого шару може бути порушення його температурної стабільності внаслідок додаткового теплового опору металокерамічного покриття.

Висновки. Визначено підвищення антифрикційних та протизношувальних показників мастильних матеріалів за рахунок додаткового їх модифікування графітом, дисульфідом молібдену, фулеренами, нанотрубками або ремонтно-

відновлювальним складом. Механізм поліпшення експлуатаційних характеристик мастильних матеріалів з модифікаторами тертя полягає в створенні захисного поверхневого шару в процесі самоорганізації трибосистеми при терті.

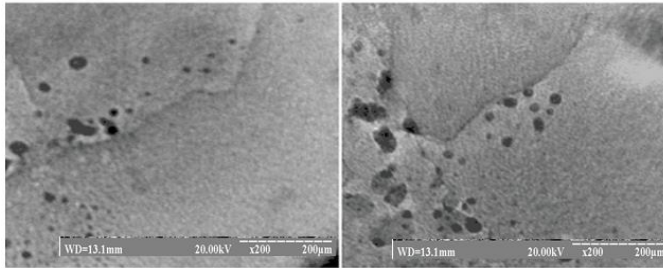


Рис. 5. Поверхня тертя сталі 40Х після напрацювання 500 циклів при змащуванні трансмісійною оливою ТАД-17і з додаванням 1,5 % ПВС

Список літератури

1. Ivschenko L., Tsyganov V., Frolov M. The structural self-organization of details of tribocoupling in the conditions of the complicated thermodynamic loading. *VisnykChernihiv State Technological University*. 2012. №3 (59). P. 5-11.
2. Ivshchenko, L.I., Tsyganov, V.V., Zakiev, I.M. Features of the wear of tribojoints under three-dimensional loading. *J. Frict. Wear*. 2011. Vol. 32, Is. 1. P. 8–16.
3. Garkunov D. Current problems of triboengineering and its public importance. *Repair, restoration, modernization*. 2007. no 6. P. 2-4.
4. Golchin A., Simmons G.F., Glavatskih S., Prakash B. Tribological behaviour of polymeric materials in water-lubricated contacts. *Proc Inst Mech Eng Part J J Eng Tribol*. 2013. 227 (8). P. 811-825..
5. S. Pan G., Guo Q., Ding J., Zhang W., Wang X. Tribological behaviors of graphite epoxy two-phase composite coatings. *Tribol. Int*. 2010. 43. P. 1318–1325.
6. Miessler G., Tarr D. *Inorganic Chemistry*. 3rd Ed. Pearson/Prentice Hall publisher, 2004.
7. Shriver D., Atkins P., Overton T., Rourke J. P., Weller M., Armstrong F. *Inorganic Chemistry*. New York: W. H. Freeman and company., 2006.
8. Oak Ridge National Laboratory URL: https://web.archive.org/web/20100112175543/http://www.ornl.gov/info/press_releases/get_press_release.cfm?ReleaseNumber=mr19950329-01. Miessler G. *Inorganic Chemistry* Pearson / Prentice Hall publisher, 2004.
9. Енциклопедія сучасної України URL: <https://esu.com.ua/article-66072> (Last accessed: 14.03.2023).
10. Bezmel'nicyn V. N., Eleckij A. V., Okun' M. V. Fullereny v rastvorah. *Uspehi fizicheskikh nauk*. 1998. № 11. 1195-1220.
11. Gindzburg B. M., Bajdakova M. V., Kireenko O. F. et all. Vlijanie fullerenov S60, fullerenovyh sazh i drugih uglerodnyh materialov na granichnoe trenie skol'zhenie metallov. *Zhurnal tehnicheskoy fiziki*. 2000. № 12. P. 87-97
12. Carbon nanomaterials: electronic structure and processes structure formation / Ya.V. Zaulichny, S.S. Petrovskaya, E.V. Grayvoronskaya, Yu.M. Corned beef. Kyiv: Naukova Dumka, 2012. 277 p.

Стаття надійшла до редакції 24.05.2023.

Малярчук Ігор Володимирович – аспірант кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 067 419 86 12 E-mail: 4619672@stud.nau.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0008-7953-6209>.

I. V. MALYARCHUK

THE EFFECT OF FRICTION MODIFIERS ON THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF LUBRICANTS

The analysis of antifriction and antiwear additives to lubricants has been carried out and the mechanisms of formation of protective films on tribocontact elements have been considered. An increase in the antifriction and antiwear characteristics of lubricants due to their additional modification with graphite, molybdenum disulfide, fullerenes, nanotubes or a repair composition has been established. The mechanism for increasing the efficiency of lubricants with friction modifiers is to create a protective surface layer in the process of tribosystem self-organization during friction. It has been established that by empirical analysis it is possible to choose the optimal concentration of the repair and restoration compound RVS, the addition of which to the gear oil provides an increase wear resistance of steel under rolling conditions with slippage. Reducing the wear of contact surfaces is facilitated by mechanical chemical processes that manifest themselves during structural adaptability of finely dispersed components of the geomodifier friction RVS, boundary lubricating films and metal surface layers at friction under dynamic loading conditions. For the main indicators providing an increase in the wear resistance of friction pairs are microhardness of metal surface layers and its gradient depth distribution, microgeometry of the surface layer, formed during friction, and the formation of boundary lubricating layers on friction-activated contact surfaces. These processes are a manifestation of structural adaptability structural materials under study, the consequence of which is qualitative and quantitative change in the microgeometry of surfaces friction. Fullerenes and nanotubes are elementary objects of nanotechnologies, on the basis of any possible macro-objects, which may be of practical importance, - materials and outbuildings. The potential of using these structures (especially nanotubes) exceeds potential of other nanostructures.

Keywords: wear, repair and restoration composition, graphite, molybdenum disulfide, coefficient of friction.

References

1. Ivschenko L., Tsyganov V., Frolov M. The structural self-organization of details of tribocoupling in the conditions of the complicated thermodynamic loading. *VisnykChernihiv State Technological University*. 2012. №3 (59). P. 5-11.
2. Ivshchenko, L.I., Tsyganov, V.V., Zakiev, I.M. Features of the wear of tribojoints under three-dimensional loading. *J. Frict. Wear*. 2011. Vol. 32, Is. 1. P. 8-16.
3. Garkunov D. Current problems of triboengineering and its public importance. *Repair, restoration, modernization*. 2007. no 6. P. 2-4.
4. Golchin A., Simmons G.F., Glavatskih S., Prakash B. Tribological behaviour of polymeric materials in water-lubricated contacts. *ProcInstMechEng Part J JEngTribol*. 2013. 227 (8). P. 811-825.
5. S. Pan G., Guo Q., Ding J., Zhang W., Wang X. Tribological behaviors of graphite epoxy two-phase composite coatings. *Tribol. Int*. 2010. 43. P. 1318-1325.
6. Miessler G., Tarr D. *Inorganic Chemistry*. 3rd Ed. Pearson/Prentice Hall publisher, 2004.
7. Shriver D., Atkins P., Overton T., Rourke J. P., Weller M., Armstrong F. *Inorganic Chemistry*. New York: W. H. Freeman and company., 2006.
8. Oak Ridge National Laboratory URL: https://web.archive.org/web/20100112175543/http://www.ornl.gov/info/press_releases/get_press_release.cfm?ReleaseNumber=mr19950329-01. Miessler G. *Inorganic Chemistry* Pearson / Prentice Hall publisher, 2004.
9. *Енциклопедія сучасної України* URL: <https://esu.com.ua/article-66072> (Last accessed: 14.03.2023).
10. Bezmel'nicyan V. N., Eleckij A. V., Okun' M. V. *Fullerenyvrstvovrah. Uspehifizicheskikh nauk*. 1998. № 11. 1195-1220.
11. Gindzburg B. M., Bajdakova M. V., Kireenko O. F. et al. Vliyanie fullerenov S60, fullerenovyh sazh i drugih uglerodnyh materialov na granichnoe trenie skol'zhenie metallov. *Zhurnaltehnicheskofiziki*. 2000. № 12. P. 87-97
12. Carbon nanomaterials: electronic structure and processes structure formation / Ya.V. Zaulichny, S.S. Petrovskaya, E.V. Grayvoronskaya, Yu.M. Corned beef. Kyiv: Naukova Dumka, 2012. 277 p.

Malyarchuk Igor Volodymyrovich – graduate student of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: 4619672@stud.nau.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0008-7953-6209>.