

*А.В. ПАЛЄСВ, В.Г. КОТУХ, канд. техн. наук, Ю.Ю. ГУСЄВА, д-р техн. наук,
К.М. ПАЛЄСВА*

ДО ПИТАННЯ ОБГРУНТУВАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ГАЗОРОЗПОДІЛЬНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Вступ

В умовах сьогодення існує багато викликів щодо роботи систем газопостачання. Суттєва зміна за останні роки політичної та економічної ситуації, кількісного та якісного складу населення нашої держави, зміна логістичних шляхів, а, з іншого боку, стрімкий розвиток сучасних технологій та обладнання зумовлюють необхідність в зміні підходів до структури систем газопостачання. Зокрема це стосується питання проектування, перепроєктування та реконструкції таких систем в умовах невизначеності. При цьому виникає низка проблем, вирішити які традиційними методами оптимізаційних розрахунків досить складно, а іноді зовсім неможливо. В першу чергу це стосується проблем, що виникають через економічні та технологічні аспекти формування систем газопостачання.

Однією з найактуальніших проблем, з якою постає в процесі розробки проєктів планування, переplanування та реконструкції газотранспортних систем, є задача максимального задоволення потреб в теплоенергопостачанні усіх груп споживачів (промислових підприємств, населення, інфраструктурних об'єктів і т. ін.) з урахуванням напрямків і зон розташування споживачів, видів та існуючих схем розподілу енергоносіїв тощо.

Тому вибір енергоносіїв та проектування схем теплоенергопостачання має здійснюватися не для окремих ізольованих районів або споживачів, а комплексно, для цілої більш чи менш значної групи, яка є відомою планувальною єдністю та визначається природними умовами, особливостями місцевої транспортної мережі, спільністю джерел енергії, а також виробничими та адміністративними зв'язками тощо. Це дозволить розробити базисний варіант відповідних транспортних комунікацій таких систем з метою оптимального трасування усіх розподільчих мереж і ліній, необхідних для забезпечення подачі енергоносія до можливих споживачів.

Тому питання обґрунтування математичних моделей техніко-економічних показників газотранспортних систем є актуальним та дозволить удосконалити процес створення та функціонування спеціальних методів та інформаційних технологій моніторингу стану газотранспортних систем в умовах невизначеності.

Викладення основного матеріалу

Питанням ефективності функціонування газотранспортних систем приділяється увага багатьох науковців. Зокрема, в роботі [1] розглядаються питання економічної ефективності функціонування газотранспортних підприємств та визначаються критерії її оцінки. В [2] автором визначаються критерії надійності функціонування локальних газотранспортних систем. В [3] «...приведені змістовні постановки задач оптимального планування режимів роботи складних газотранспортних систем».

Низка робіт присвячена висвітленню питань надійності та ефективності роботи окремих складових газотранспортних систем або окремих режимів їх роботи. Так, в [4] досліджується вплив «...чинників на аварійність лінійної частини магістральних газопроводів, з метою подальшого керування ними за допомогою ефективного процесу відтворення», робота [5] присвячена питанням надійності газоперекачувальних агрегатів та газопроводів, в [6] «...наведені результати аналітичних досліджень гідравлічної ефективності складних газотранспортних систем», в [7] досліджуються процеси витоків газу через дефекти в тілі магістра-

льних газопроводів та «...вплив зміни діаметра дефекту і відстані до місця витоку від початку перегону між компресорними станціями, на значення тиску та температури в кінці перегону».

Також було проаналізовано досвід організації роботи газотранспортних систем в інших країнах світу. Так, в [8] розглядаються економічні особливості організації загальної транспортної мережі в Японії, аналізуються фактори будівництва та експлуатації трубопроводів в умовах невизначеності, коротко- та довготривалі перспективи взаємодії окремих газових комунальних служб (з урахуванням їх взаємного розташування), визначається необхідність державної підтримки будівництва загальної системи газопроводів.

В [9] розглядаються питання доцільності переведення енергетичної системи Македонії з вугілля на природний газ та проводиться порівняльний аналіз шести окремих варіантів постачання природного газу споживачам з точки зору економічної, соціальної та екологічної доцільності.

В [10] досліджується методика та процедура оцінки ймовірності, аналізу наслідків і кількісної оцінки економічного ризику аварій системи газотранспортних трубопроводів на прикладі розташованої в Китаї ділянки трубопроводу, що включає лінійну частину та компресорну станцію. У свою чергу в [11] на основі аналізу витрат і вигод авторами запропонована методологія визначення цільової надійності газопостачання системи газопроводів, а також проводиться дослідження впливу терміну експлуатації системи на цільову надійність газопостачання (на прикладі реальної ділянки газопроводу, що розташована в Китаї).

Аналіз публікацій показав, що основна увага приділяється питанням експлуатації газотранспортних систем. Питання будівництва розглядаються, зазвичай, з точки зору загальнодержавної організації. Велика увага приділяється питанням забезпечення надійності функціонування та прогнозування режимів роботи саме магістральних газопроводів. Такий підхід спостерігається як в дослідженнях закордонних вчених, так і в роботах більшості вітчизняних авторів. Однак зміни внутрішньо- та зовнішньополітичної та економічної ситуації спонукають до швидких змін в організації системи енергопостачання нашої держави, а отже, і до певної зміни підходів до питання організації функціонування газотранспортних систем на усіх етапах їх життєвого циклу.

Етапи проектування, перепроєктування та реконструкції газотранспортних систем є одними з найважливіших етапів життєвого циклу, оскільки значні передумови надійності функціонування цих систем закладаються саме на цих етапах. Окрім того, газотранспортні системи є основними за матеріало-, ресурсо- та капіталоємністю спорудами будь-якої системи розподілу енергоносіїв. На їх спорудження, обслуговування та ремонт витрачається до 90 % усіх капітальних вкладень на системи теплоенергозабезпечення. Із загальної протяжності газотранспортних систем від 60 до 80 % складають газопроводи низького тиску і 20–30 % – середнього та високого тиску.

Згідно з [12], «...однією зі складових газотранспортних систем є газорозподільні системи. Газорозподільні системи мають широку номенклатуру складових та елементів, широкий перелік вимог до умов їх виготовлення, експлуатації та ремонту, вони знаходяться під дією великої кількості зовнішніх факторів тощо».

У загальному випадку будівництво газорозподільних систем, розташованих в межах будь-яких територіальних комплексів, наприклад області, міста, району міста тощо, є тривалим процесом поступового розширення системи енергопостачання, що охоплює усі нові групи і категорії споживачів. Зміна структури газорозподільних систем відбувається через зміну складу споживачів або з метою удосконалення конфігурації. Але такі зміни дуже рідко носять масовий характер і не вимагають прийняття термінових рішень.

Але через значні руйнування внаслідок воєнних дій та через зміну економічної ситуації, що відбулися в нашій країні в досить стислий період часу, виникла потреба пошуку нових підходів до надійності функціонування систем забезпечення енергоресурсами кінцевих споживачів, в тому числі газотранспортних систем. Наразі актуальними є питання децентраліза-

ції таких систем, спорудження нових, реконструкції та підтримання надійності функціонування окремих їх елементів та складових. Тому в даній статі автори ставлять собі на меті розглянути шляхи підвищення ефективності проектування, перепроєктування та реконструкції газорозподільних систем та обґрунтування математичних моделей техніко-економічних показників газорозподільних систем в умовах невизначеності.

Одним з питань, що потребують дослідження, є визначення оптимальної черговості будівництва та такого порядку введення в експлуатацію нової системи (або реконструкції існуючої системи), при якому загальні витрати за час будівництва (реконструкції) були б мінімальними [13]. Визначення оптимальної черговості будівництва газорозподільних систем повинно здійснюватися з урахуванням ряду характерних особливостей:

1. До складу газорозподільних систем входять дві групи споруд:

– ті, що забезпечують енергоспоживання певної єдиної територіальної одиниці (області, населеного пункту, району тощо) або єдиної групи споживачів;

– ті, що забезпечують енергоспоживання групи територіальних одиниць (груп споживачів), наприклад відводи від магістральних газопроводів та відгалуження від них (у випадку, коли вони необхідні, ГРС тощо).

2. При переході групи споживачів на споживання природним газом інші споживачі продовжують користуватися існуючою системою енергопостачання, економічність якої може знизитися внаслідок зниження інтенсивності її використання.

3. Окремі частини схем газорозподільних систем характеризуються різною економічною ефективністю. У цьому випадку при значному часі будівництва або реконструкції усієї системи енергоспоживання будь-якої територіальної одиниці (групи територіальних одиниць), його слід розглядати як тривалий в часі процес переходу до споживання природним газом нової групи (груп) споживачів.

4. Мережевий характер газорозподільних систем обумовлює велику кількість можливих варіантів будівництва (реконструкції). Можливість об'єднати споживачів в різні за складом групи, підвищуючи економічність енергопостачання, обумовлює різний економічний ефект за весь період будівництва.

5. Щільність розміщення територіальних одиниць обумовлює малу протяжність та діаметри лінійних елементів газорозподільних систем, а також малі обсяги робіт з підготовки споживачів до прийому газу. Наслідком цього є незначна величина пускових комплексів, будівництво яких може бути завершено в термін, що не перевищує один рік. Таким чином, для визначення черговості будівництва (реконструкції) складної мережевої схеми газорозподільних систем доцільно застосувати комплекс техніко-економічних показників, який включатиме математичні методи або моделі, які дозволять виокремити найоптимальніший варіант будівництва (реконструкції).

Розглянемо опис такої математичної моделі (рис. 1). Нехай споживачі певної єдиної територіальної одиниці для забезпечення своїх енергетичних потреб отримують енергоносії q видів. Економічно обґрунтованим може бути використання в одній територіальній одиниці для різних видів споживачів як одного, так і декількох видів енергоносіїв. Транспортування енергоносія здійснюється через певні «логістичні» пункти. Іноді такий пункт можна умовно замінити набором так званих допоміжних пунктів, у якості яких використовуються окремі види споживачів (склади, розподільчі станції тощо) [14].

Наприклад, якщо природним газом забезпечуються лише споживачі груп 1 та 3, то у вартість використання шляху від 1 до 3 слід включати лише додаткові витрати, що виникають під час переведення на природний газ виробничих об'єктів. Така модель допускає порівняння різних (з точки зору трасування) схем забезпечення будь-якої територіальної одиниці одним і тим саме енергоносієм, умовно вважаючи, що вони мають, наприклад, різні енергоносії [14].

Розглянемо схему постачання групи територіальних одиниць одним з енергоносіїв, а саме – природним газом. З достатнім ступенем точності її можна зобразити графом Γ^j ,

вершинами якого є окремі споживачі (групи споживачів), а дугами – шляхи транспортування j -го енергоносія між кожною парою суміжних споживачів.

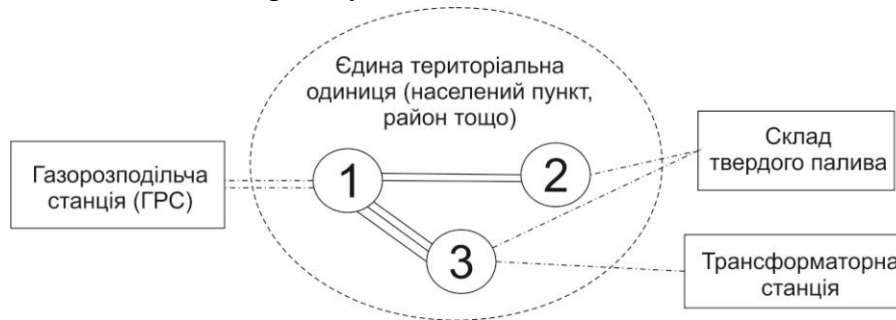


Рис. 1. Граф-схема постачання різними видами енергоносіїв єдиної територіальної одиниці (1 – комунально-побутові споживачі; 2 – опалювальне навантаження; 3 – виробничі споживачі)

Усі витрати, пов'язані з транспортуванням j -го енергоносія, можна поділити на дві групи. В першу групу можна включити витрати, які виконують виключно в інтересах кожного з розглянутих споживачів (групи споживачів) окремо. Наприклад, усі витрати, пов'язані з обладнанням i -го споживача (групи споживачів) для приймання j -го типу енергоносія, і кінцеві витрати на необхідну споживачеві i кількість j -го енергоносія. Загальну суму таких витрат позначають через a_i^j . У другу групу включимо витрати на будівництво (реконструкцію) та експлуатацію споруд, що знаходяться у загальному користуванні декількох споживачів. Прикладами таких споруд можуть бути ГРС, загальні ділянки газопроводів, склади тощо. Ці величини відповідатимуть дугам графу Γ^j . Величина цих витрат суттєво залежить від навантаження на дугу графа та режиму експлуатації системи [13].

Так, наприклад, діаметр трубопроводів будь-якої ділянки лінійної частини газорозподільної системи залежить, в першу чергу, від того, які споживачі, у якій мірі, за яких максимальних витрат часу та ресурсів будуть постачатися природним газом, а також від рівня тиску та втрат газу на цій ділянці. Тобто можна зазначити, що капітальні витрати на будівництво чи реконструкцію ділянки газорозподільної системи напряму залежать від експлуатаційних витрат на транспортування природного газу по цій ділянці.

Слід зазначити, що вид технологічного обладнання для транспортування енергоносіїв обирається з набору стандартних споруд. Пронумеруємо їх і позначимо через a_{im}^{jg} вартість використання графа витрат Γ^j , що транспортує енергоносії з пункту i в пункт m , якщо на цій ділянці використовується номер споруди g ($g = 1, 2, 3, \dots, G$). Наприклад, при $g = 1$, величина a_{im}^{j1} – це витрати на газопровід діаметром 100 мм на ділянці (i, m) , при $g = 2$ величина a_{im}^{j2} – витрати на газопровід діаметром 150 мм і т. д. Довільну сукупність пунктів (споживачів чи груп споживачів), що постачаються j -м енергоносієм, позначимо через y_j , а ту частину графа Γ^j , яка використовується для постачання пунктів з сукупності y_j , позначимо через $\Gamma^j(y_j)$ [14].

Задача полягає в розбитті пунктів кожної територіальної одиниці на множини U_1, U_2, \dots, U_g таким чином, щоб загальна сума витрат досягала свого найменшого значення:

$$f(y_1, y_2, \dots, y_g) = \sum_{j=1}^g \left(\sum_{(i,m) \in \Gamma^j(y_j)} a_{im}^{jg} + \sum_{i \in y_j} a_i^j \right), \quad (1)$$

де g – номер стандартної споруди для (i, m) у випадку, коли j -м енергоносієм постачаються споживачі, що входять в множину y_j [14].

Перша сума в дужках задає витрати на транспортування j -го енергоносія в пункти сукупності y_j , друга – першу групу витрат за тією самою сукупністю пунктів.

Позначимо через індекси Γ^1 і Γ^2 газорозподільну систему, яка буде спроектована, та систему, яка існує і підлягає реконструкції. Нехай Γ^1 – спроектована газорозподільна система, що складається з певних пунктів – споживачів теплової енергії, та ділянок системи з розташованим на них обладнанням під індексом w . Сукупність пунктів системи позначимо через A , і сукупність ділянок системи – через w^1 . Γ^2 – існуюча газорозподільна система, що підлягає реконструкції. Сукупність напрямків системи Γ^2 – є існуючими транспортними комунікаціями, що пов'язують між собою окремих споживачів, позначимо через w^2 . Причому сукупність напрямків системи Γ^2 буде аналогічна системі Γ^1 [14].

Нехай K_i^1 – капіталовкладення, необхідні для підготовки пункту i до приймання природного газу, тобто для будівництва ділянки газорозподільних систем та споживчих систем природного газу, K_w^1 – капіталовкладення, необхідні для будівництва напрямку транспортування природного газу w . Експлуатаційні витрати на транспортування природного газу за напрямком w подаємо у вигляді суми:

$$C_w^1 + a_w^1 x, \quad (2)$$

де C_w^1 – величина витрат, що не залежать від кількості транспортованого за напрямком w газу; a_w^1 – коефіцієнт пропорційності; x – кількість газу, що транспортується за напрямком w [14].

Нехай C_i^1 – експлуатаційні витрати при прийманні в пункт i природного газу, що включають в себе:

- кінцеві витрати на потрібну в цьому пункті кількість газу;
- сумарні транспортні витрати, що лінійно залежать від кількості транспортованого газу, і відповідають усім напрямкам від головного пункту до кожного споживача;
- витрати з експлуатації газорозподільних систем, а також споживчих систем використання газу у відповідному пункті (з урахуванням технологічного ефекту, що досягається при заміні газом раніше використовуваного енергоносія).

Аналогічно визначаються величини C_i^2 і C_w^2 , які характеризують експлуатаційні витрати за існуючою системою енергопостачання.

Стан газорозподільної системи в кожному мить часу зручно характеризувати переліком споживачів, що реалізують споживання природним газом. Позначимо через y деяку сукупність пунктів, що підлягають споживанню газом, а через $w^1(y)$ – множину напрямків системи Γ^1 , які для цього необхідні. Тоді ця частина системи Γ^1 буде характеризуватися вартістю основних фондів для будівництва газорозподільної системи окремої єдиної територіальної одиниці:

$$K^1(y) = \sum_{i \in y} K_i^1 + \sum_{w \in w^1(y)} K_w^1 \quad (3)$$

та експлуатаційними витратами

$$C^1(y) = \sum_{i \in y} C_i^1 + \sum_{w \in w^1(y)} C_w^1, \quad (4)$$

де $\sum_{i \in y} K_i^1$, $\sum_{i \in y} C_i^1$ – відповідно сумарні капіталовкладення та експлуатаційні витрати, пов'язані

з прийманням газу споживачами (пунктами), що належать до множини y ;

$\sum_{w \in w^1(y)} K_w^1$, $\sum_{w \in w^1(y)} C_w^1$ – те саме стосовно газорозподільних систем, що забезпечують подачу

газу до множини споживачів (пунктів) y [14].

Враховуючи вплив особливостей газорозподільних систем на методику визначення оптимальної черговості їх будівництва, слід сказати, що такі системи розміщуються з максимальним наближенням до найкрупніших споживачів, що мають високі показники ефективності енергоспоживання. Менш ефективні споживачі потрапляють в менш сприятливі умови і для їх енергопостачання необхідна додаткова локальна мережа, наявність якої ще більше знизить показники ефективності газопостачання в цілому [15].

Отже, з огляду на зазначене, доцільним є подальше доопрацювання розглянутих математичних моделей з урахуванням впливу наведених особливостей газорозподільних систем на методику визначення їх техніко-економічних показників.

Висновки

1. Газотранспортні та газорозподільні системи є основними за матеріало-, ресурсо- і капіталоемністю спорудами будь-якої системи розподілу енергоносіїв.

2. Визначення оптимальної черговості будівництва (реконструкції) газорозподільних систем повинно здійснюватися з урахуванням низки характерних особливостей.

3. При побудові математичної моделі газорозподільних систем слід враховувати, що економічно обґрунтованим може бути використання в одній територіальній одиниці для різних видів споживачів як одного, так і декількох видів енергоносіїв.

4. Схему постачання групи територіальних одиниць природним газом як одним з видів енергоносіїв, що здійснюється за допомогою газорозподільних систем, можна зобразити графом, вершинами якого є окремі територіальні одиниці, а дугами – шляхи транспортування енергоносія між кожною парою суміжних споживачів.

5. Діаметр трубопроводів будь-якої ділянки лінійної частини газорозподільної системи залежить, в першу чергу, від того, які споживачі, у якій мірі, за яких максимальних витрат часу та ресурсів будуть постачатися природним газом, а також від рівня тиску та втрат на цій ділянці.

6. Вид технологічного обладнання для транспортування енергоносіїв у складі газорозподільних систем обирається з набору стандартних споруд.

7. Стан газорозподільних систем як систем енергопостачання в будь-який момент часу зручно характеризувати переліком споживачів, що реалізують споживання природним газом.

8. Враховуючи особливості проектування та будівництва локальних газотранспортних систем, слід зазначити, що газорозподільні системи розміщуються з максимальним наближенням до найкрупніших споживачів, які мають високі показники ефективності енергоспоживання.

9. З огляду на вплив наведених особливостей газорозподільних систем на методику визначення їх техніко-економічних показників доцільним є подальше доопрацювання розглянутих математичних моделей, зокрема з точки зору визначення черговості будівництва та введення в експлуатацію окремих складових газорозподільних систем, що проектуються, перепроєктуються чи реконструюються. Крім того, слід дослідити питання технічних, економічних, екологічних та соціальних перспектив проектування, перепроєктування та реконструкції газорозподільних систем з точки зору концепції сталого розвитку та визначити шляхи подальшого їх ефективного функціонування в умовах невизначеності.

Список літератури:

1. Груб'як С.В. Дослідження шляхів підвищення ефективності діяльності газорозподільних підприємств // Економіка і суспільство. 2018. № 18. С. 340–344.
2. Степ'юк М.Д. Критерії надійності функціонування локальної системи // Наук. вісник Івано-Франків. нац. техн. ун-ту нафти і газу. 2009. № 1. С. 114–116.
3. Притула Н., Притула М., Фролов В. Оптимальне планування режимів роботи складних газотранспортних систем // Матеріали міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання». Івано-Франківськ : Голіней О.М., 2017. С. 414–417.
4. Федорович І.В. Надійність експлуатації лінійної частини магістральних газопроводів та дослідження причин аварійності // Агросвіт. 2013. № 5. С. 42–45.
5. Копей Б.В., Бенмуна А., Слободян В.І., Беллауар А., Галій С.І., Халімі Д., Найда А.М. Підвищення надійності газотранспортних систем : моногр. Сер. «Нафтогазове обладнання». Т. 8. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2012. 300 с.
6. Грудз В.Я. Діагностика гідравлічного стану складних газотранспортних систем // Наука та інновації. 2005. 1. № 5. С. 87–100.
7. Дорошенко Я. В. Моделювання витікань газу з газопроводів в аварійних ситуаціях // Вісник ВПІ. 2020. Вип. 3. С. 22–28.
8. Hashimoto S. The Importance of Government Support for Pipeline Network Construction // Pipeline Engineering - Design, Failure, and Management. 2022.
9. Mladenovska D., Lazarevska A. M. Socio-economic Indicators Influence in Terms of Natural Gas Supply Policy and Decision. TEM Journal. 2019. Vol. 8 (1). P. 132–143.
10. Shi G., Yu W., Wang K., Dang F., Gong J., Lu Y. Time-dependent economic risk analysis of the natural gas transmission pipeline system // Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 146. P. 432–440.
11. Shan X., Yu W., Hu B., Wen K., Ren Sh., Men Y., Li M., Gong J., Zheng H., Hong B. A methodology to determine target gas supply reliability of natural gas pipeline system based on cost-benefit analysis // Reliability Engineering & System Safety. 2024. Vol. 251.
12. Палєєв А.В., Котух В.Г. До питання надійності та ремонтпридатності окремих елементів арматури газорозподільних систем // Комунальне господарство міст. Сер.: Технічні науки та архітектура. Харків, 2024. 1(182). С. 8–13.
13. Пешехонов Н.І. Проектування газопостачання. Київ, 1970. 147 с.
14. Берхман С.І. Економіка систем газопостачання. Ленінград : Недра, 1975. 375 с.
15. Дубінський Н.М. Надійність систем газопостачання. Київ, 1970. 215 с.

Надійшла до редколегії 07.10.2024

Відомості про авторів:

Палєєв Артем Вікторович – Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, аспірант, Україна, e-mail: artem.palieiev@kname.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6044-0786>

Котух Володимир Григорович – канд. техн. наук, доцент, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, доцент кафедри нафтогазової інженерії та технологій, Україна, e-mail: volodimir.kotuh@kname.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6679-8620>

Гусєва Юлія Юрїївна – д-р техн. наук, доцент, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, професор кафедри управління проектами в міському господарстві і будівництві, Україна, e-mail: yulia.guseva@kname.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6992-543X>

Палєєва Катерина Миколаївна – Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, старший викладач кафедри нафтогазової інженерії та технологій, Україна, e-mail: kateryna.palieieva@kname.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6004-2331>