

Андрій Онищенко, д. е. н.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСФОРМАЦІЇ ГАЛУЗЕВИХ ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ В УМОВАХ СКОРОЧЕННЯ ЕМІСІЙ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ

Andrii Onyshchenko, ScD in Economics

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine

MODELING THE TRANSFORMATION OF ECOLOGICAL AND ECONOMIC SECTOR-INDICATORS UNDER GREENHOUSE GAS EMISSION REDUCTION

The article proposes a modified balance of ecological and economic "input-output" model, which is based on established by the United Nations Conference on Climate Change in Paris (Paris Agreement – PA) limits on greenhouse gas emissions. It determines conditions for existence of the productivity model, which provides non-negativity of economic and environmental performance.

The paper offers mathematical apparatus of determining the change in the volume of gross output of primary and secondary production in the event of changes in the sector structure. Also the algorithm was proposed for determining the values of key economic and ecological factors of balance model. On the basis of the proposed algorithm simulation in the conventional data was implemented.

Key words: sustainable development, the Paris Agreement, ecological and economic system, Leontief "input-output" model, Leontief-Ford "input-output" model, simulation.

Вступ. Перспективний аналіз розвитку сучасної як теоретичної, так і практичної економіки засвідчує посилення тенденції врахування соціального фактору і забезпечення життєдіяльності на Землі в глобальних масштабах. Можна очікувати, що вже в найближчому майбутньому ця тенденція посяде головну позицію у світовій економіці і буде суттєво визначати міжнародні економічні відносини. На перший план в умовах глобалізації світової економіки і світових економічних зв'язків виступає пріоритет забезпечення повноцінного майбутнього світового суспільства. В контексті цього значно зростає врахування екологічного фактору в макроекономіці і особливим чином постає специфічна проблема ролі, місця та організації екологічної складової. Відповідно особливої актуальності набуває розробка нового концептуального підходу до екологічного ресурсу як сучасної економічної категорії, врахування якої необхідно буде зводити до розробки нової концепції екологічної економіки, світових економічних зв'язків, пошуку оптимальних шляхів міждержавної співпраці в питаннях охорони довкілля, ресурсозбереження та маловідходних технологій.

З метою практичної реалізації поставлених завдань Організацією Об'єднаних Націй було створено Рамкову Конвенцію зі Зміни Клімату (РКЗК ООН)¹, основною метою якої є встановлення порядку скорочення викидів в атмосферу парникових газів, в першу чергу, діоксиду вуглецю. Їх накопичення визнано причиною однієї з основних екологічних проблем сьогодення – глобального

¹ *Рамочная Конвенция ООН об изменении климата 1992.* (Организация объединенных наций). *Официальный сайт Организации объединенных наций.* <<http://unfccc.int/resource/docs/convru.pdf>> (2007, март, 05).

потепління. За результатами тривалих перемовин конференції сторін зі зміни клімату у Франції 12 грудня 2015 року було підписано Паризьку угоду¹, яка визначає правила скорочення емісій парникових газів у світовому масштабі. Зазначена мета вимагає реалізації відповідних структурних змін у різних секторах економічної системи, взаємодії її складових та виокремлення екологічного блоку, як самостійної одиниці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теорія еколого-економічної взаємодії є порівняно новим напрямом розвитку економічної науки, який ґрунтується на засадах метафізики економіки, соціальної динаміки, теорії суспільного вибору, теоріях управління.

Методологічні засади дослідження процесів взаємодії економіки та екології активно досліджували такі вчені, як: В. Вернадський, М. Мойсєєв, С. Дорогунцов, О. Рюміна, Ю. Іванілов, О. Лотов, В. Макаров, О. Рубінов, Р. Раяцкас, а також зарубіжні вчені У. Айзерд, Р. Айрес, Г. Дейл, З. Гул, Р. Костанзи, Дж. Кей, М. Джампетро, С. Ель Серафі.

Механізми та результати екологізації економіки знаходять своє відображення в працях основоположників балансових методів дослідження В. Леонтєєва, Д. Форда, Дж. Неймана, М. Морішима, Д. Гейла, моделях вчених Римського клубу М. Медоуза, Дж. Форрестера, М. Печчеї.

Дослідження особливостей змісту механізмів скорочення емісій парникових газів та їх економічної складової широко представлено в публікаціях О. Кокоріна, В. Бердина, Г. Сафонова, В. Шевчука, І. Трофимової, О. Трофимчука, К. Танген, М. Граб, А. Міхаєлова, Б. Мюллера та ін.

Невирішені проблеми. В той же час, незважаючи на ґрунтовні наукові напрацювання та постійно зростаючий обсяг робіт з тематики економіки скорочення емісій парникових газів, складність та багатогранність її еколого-економічної взаємодії потребує подальшого вивчення з метою розробки нових та вдосконалення вже існуючих методів вирішення соціально-економічних проблем та збереження природно-ресурсного потенціалу. Дослідження вказаних проблем часто зводиться до вивчення на окремо взятому рівні та часто носять локальний характер. У зв'язку з цим, виникає необхідність вивчення впровадження в дію механізмів Паризької угоди на основі єдиної методики системного моделювання еволюційного розвитку економіки, яка б дозволила пов'язати мікро-, макро- та міждержавний рівень. Завдання створення методології моделювання та комплексу математичних моделей економічної складової Паризької угоди, які дозволяють визначити оптимальні значення та поведінку основних еколого-економічних показників, як основи прийняття управлінських рішень, спрямованих на підвищення ефективності функціонування економічної системи, зумовило зміст статті, її мету, завдання та логіку дослідження².

Постановка завдання. Низка питань, пов'язаних з участю країни в Паризькій угоді, визначає необхідним, в першу чергу, оцінку потенційного обсягу майбутнього ринку екологічних послуг, визначення можливих партнерів, розробку економічної стратегії, яка б визначала пріоритети стосовно кожного економічного механізму, пропорції їх застосування з метою залучення максимального обсягу екологічних інвестицій.

Особлива роль у розв'язанні принципів проблем природокористування – обґрунтування величини витрат на охорону довкілля з врахуванням соціально-економічного ефекту та розподілу їх у територіально-галузевому розрізі – належить балансовим еколого-економічним моделям типу «витрати-випуск», а також регіональним та галузевим моделям.

Історично першою і в певному розумінні найбільш простою математичною моделлю міжгалузевих виробничих зв'язків, прийнятною для практичних розрахунків стала балансова модель «витрати-випуск»³.

Якщо ввести в розгляд матрицю коефіцієнтів прямих матеріальних витрат $A = (a_{ij})$, вектор-стовпчик валової продукції $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T$ та вектор-стовпчик кінцевої продукції $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)^T$, то балансова модель в матричній формі набуде вигляду:

$$X = AX + Y. \quad (1)$$

Система рівнянь (1) називається економіко-математичною моделлю міжгалузевого балансу (моделлю Леонтєєва, моделлю «витрати-випуск»).

¹ *Sustainable Innovation Forum*, 2016. <<http://www.cop21paris.org>> (2016, February, 05).

² Онищенко, А.М., Ляшенко, І.М. (2011). Методологія математичного моделювання економіко-екологічної взаємодії в умовах реалізації Кіотського протоколу. *Економічна кібернетика*, 4-6(70-72), 17-26.

³ Леонтєєв, В.В. (1997). *Межотраслевая экономика*. М.: Экономика.

Методологічною основою побудови балансових моделей з врахуванням процесів природокористування слугує теорія розширеного відтворення. На сучасному етапі процес відтворення поряд з відтворенням виробничих відносин, матеріальних благ та людських ресурсів необхідно включає в себе і відтворення природних ресурсів та умов.

Побудова та реалізація балансу “витрати-випуск” на основі еколого-економічної балансової схеми передбачає розв’язання цілого комплексу фундаментальних проблем сучасної науки, до переліку яких належать, наприклад, розробка надійних методів прогнозування параметрів стану довкілля та критеріїв її якості, здатних забезпечити кількісне вимірювання ступеня задоволення потреб людства у чистоті та природному різноманітті; створення науково обґрунтованої методики визначення економічного збитку від забруднення довкілля; побудова системи моделей взаємодії різних компонентів природних комплексів з врахуванням природних та антропогенних факторів та умов.

Таким чином, постає необхідність побудови балансової еколого-економічної моделі, яка б включала витрати на реалізацію зобов’язань за Паризькою угодою. При цьому невід’ємність за своїм змістом економічних та екологічних показників вимагає дослідження питання продуктивності балансової моделі. Останнє пов’язане з властивостями технологічних матриць моделі. Зміна галузевої структури еколого-економічної системи, що відображається в коефіцієнтах даних матриць в свою чергу впливає на обсяги виробництва і вимагає розробки алгоритмів визначення розв’язку без розв’язання модельних рівнянь.

Результати дослідження. Складність та багатофакторність задач скорочення викидів парникових газів в національній економіці вимагає розгляду виробництва в розрізі існуючих галузей (видів економічної діяльності), включення до їх складу обсягу витрат на реалізацію заходів за Паризькою угодою та виділення в першу чергу групи екологічно брудних серед них. У зв’язку з цим запропоновано враховувати витрати на виконання емісійних обмежень парникових газів у структурі галузей основного виробництва у вигляді:

$$\begin{cases} x_1 = A_{11}x_1 + A_{12}x_2 + Cy_2 + y_1, \\ x_2 = A_{21}x_1 + A_{22}x_2 - y_2, \end{cases} \quad (3)$$

де $x_1 = (x_1^1, x_2^1, \dots, x_n^1)^T$ – вектор-стовпчик об’ємів виробництва продукції;

$x_2 = (x_1^2, x_2^2, \dots, x_m^2)^T$ – вектор-стовпчик об’ємів знищених забруднюючих речовин;

$y_1 = (y_1^1, y_2^1, \dots, y_n^1)^T$ – вектор-стовпчик об’ємів кінцевої продукції;

$y_2 = (y_1^2, y_2^2, \dots, y_m^2)^T$ – вектор-стовпчик об’ємів незнищених забруднень;

$A_{11} = (a_{ij}^{11})_1^n$ – квадратна матриця коефіцієнтів прямих витрат продукції i на виробництво одиниці продукції j ;

$A_{12} = (a_{ig}^{12})_{i,g=1}^{n,m}$ – прямокутна матриця витрат продукції i на одиницю знищення забруднювачів g ;

$A_{21} = (a_{kj}^{21})_{k,j=1}^{m,n}$ – прямокутна матриця випуску забруднювачів k на одиницю виготовленої продукції j ;

$A_{22} = (a_{kg}^{22})_1^m$ – квадратна матриця випуску забруднювачів k на одиницю знищення забруднювачів g .

Cy_2 – витрати, пов’язані з викидами парникових газів (тобто витрати на обслуговування викидів парникових газів, зокрема, це плата за дозволи на викиди);

$C = (c_{ig}^{12})_{i,g=1}^{n,m}$ – прямокутна матриця витрат продукції i на одиницю викидів забруднювача g ;

У векторно-матричному вигляді модель (2) можна представити так:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} E_1 & C \\ 0 & -E_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix},$$

де E_1 та E_2 – відповідні одиничні діагональні матриці.

Перше рівняння запропонованої моделі відображає економічний баланс – розподіл галузевого валового випуску продукції на виробниче споживання основного та допоміжного виробництв, кінцеве споживання основного виробництва та витрати, пов'язані з виконанням зобов'язань за Паризькою угодою. Друге рівняння відображає фізичний баланс парникових газів, як суму емісій, спричинених діяльністю основного та допоміжного виробництв, та їх незнищених обсягів.

Економічний зміст змінних моделі (3) вимагає розгляду їх невід'ємних значень. Останнє тісно пов'язано з питанням продуктивності балансових моделей¹, що дозволяє вести мову про реальне функціонування виробничої системи, здатної забезпечити проміжне споживання, додатні обсяги кінцевого продукту та виконання встановлених обмежень з викидів парникових газів.

З метою дослідження питання забезпечення невід'ємності розв'язків виразимо x_2 з другого рівняння та підставимо у перше:

$$x_1 = (E_1 - A_1)^{-1} (y_1 + Cy_2 - A_{12}(E_2 - A_{22})^{-1} y_2),$$

де $A_1 = A_{11} + A_{12}(E_2 - A_{22})^{-1} A_{21}$ – квадратна матриця n -го порядку.

Також виразимо x_2 з першого рівняння та підставимо у друге:

$$x_2 = (E_2 - A_2)^{-1} (A_{21}(E_1 - A_{11})^{-1} y_1 + A_{21}(E_1 - A_{11})^{-1} Cy_2 - y_2),$$

де $A_2 = A_{22} + A_{21}(E_1 - A_{11})^{-1} A_{12}$ – квадратна матриця m -го порядку.

Таким чином, формальний розв'язок системи (3) можна записати у вигляді:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (E_1 - A_1)^{-1} & (E_1 - A_1)^{-1} (A_{12}(E_2 - A_{22})^{-1} - C) \\ (E_2 - A_2)^{-1} A_{21}(E_1 - A_{11})^{-1} & (E_2 - A_2)^{-1} (E_2 - A_{21}(E_1 - A_{11})^{-1} C) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ -y_2 \end{pmatrix}.$$

Згідно класичної методики дослідження балансових моделей узагальнимо поняття продуктивності на випадок блочної матриці з невід'ємними елементами:

$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \geq 0 \quad (4)$$

Будемо вважати невід'ємну блочну матрицю продуктивною, якщо продуктивними є матриці A_{11} , A_{12} , A_1 та A_2 . Продуктивність матриць A_1 та A_2 означає рентабельність основного та допоміжного виробництв за повним циклом виробництва продукції та за повним циклом знищення парникових газів. Якщо матриці A_{11} , A_{12} , A_1 та A_2 – продуктивні, то матриці

$$(E_1 - A_{11})^{-1} \geq 0, (E_2 - A_{22})^{-1} \geq 0, (E_1 - A_1)^{-1} \geq 0, (E_2 - A_2)^{-1} \geq 0$$

існують та мають невід'ємні елементи.

Продуктивність блочної матриці (3) не гарантує невід'ємності розв'язків системи (3).

Проаналізуємо отримані вирази для x_1 та x_2 . З системи (3) отримуємо

$$x_1 = (E_1 - A_1)^{-1} (A_{12}x_2 + Cy_2 + y_1).$$

Звідси випливає, що при $x_2 \geq 0$, $y_1 \geq 0$, $y_2 \geq 0$ виконується умова $x_1 \geq 0$.

Таким чином, необхідною та достатньою умовою невід'ємності розв'язків моделі (3) при продуктивності блочної матриці (4) та при $y_1 \geq 0$, $y_2 \geq 0$ буде умова $x_2 \geq 0$, тобто

$$(E_2 - A_2)^{-1} (A_{21}(E_1 - A_{11})^{-1} y_1 + A_{21}(E_1 - A_{11})^{-1} Cy_2 - y_2) \geq 0.$$

З останньої нерівності отримуємо достатню умову існування невід'ємних розв'язків:

$$A_{21}(E_1 - A_{11})^{-1} (y_1 + Cy_2) \geq y_2,$$

¹ Ляшенко, І.М. (1999). *Економіко-математичні методи та моделі сталого розвитку*. К.: Вища школа.

яку можна замінити ще більш жорсткою достатньою умовою:

$$A_{21}(y_1 + Cy_2) \geq y_2.$$

Остання нерівність означає, що достатньою умовою функціонування основного та допоміжного виробництв є неперевищення обсягу неутілізованих викидів парникових газів над повними емісіями парникових газів, що виникають при виробництві кінцевого продукту та витрат спрямованих на обслуговування зобов'язань за Паризькою угодою.

Розглянемо задачу визначення як зміняться вектори валового випуску та об'ємів утилізації парникових газів, якщо змінити коефіцієнти технологічних матриць, зокрема при посиленні екологічних стандартів та необхідності збільшення витрат на виконання зобов'язань за Паризькою угодою. Наприклад, припустимо, що зміни зазнають елементи однієї або кількох технологічних матриць A_{11} , A_{12} , A_{21} , A_{22} , C .

Визначимо як така зміна впливає на значення векторів x_1 та x_2 . Для цього використаємо процедуру, запропоновану в математичній літературі з матричного аналізу¹.

Запишемо модель (3) у вигляді:

$$Au = C. \tag{5}$$

де $A = \begin{pmatrix} E_1 - A_{11} & -A_{12} \\ -A_{21} & E_2 - A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$, $u = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$ – $(n+m)$ -вимірний вектор,

$C = \begin{pmatrix} E_1 & C \\ 0 & -E_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}$, E_1 , E_2 – блочні одиничні матриці відповідної розмірності, 0 – блочна нульова матриця.

Будемо також розглядати систему, збурену (в елементах матриць A_{11} , A_{12} , A_{21} , A_{22} , C) по відношенню до системи лінійних алгебраїчних рівнянь (5) виду:

$$\bar{A}u = \bar{C}. \tag{6}$$

де A , C – відповідні збурені матриці. Нехай для системи (5) знайдено опорний розв'язок та обернену матрицю. Тоді має місце наступна теорема².

Теорема 1. Між коефіцієнтами розвинення векторів-нормалей обмежень за рядками базисної матриці, елементами обернених матриць, базисними розв'язками, нев'язками обмежень в двох суміжних базисних розв'язках мають місце такі співвідношення:

$$\bar{\alpha}_{rk} = \frac{\alpha_{rk}}{\alpha_{lk}}, \bar{\alpha}_{ri} = \alpha_{ri} - \frac{\alpha_{rk}}{\alpha_{lk}} \alpha_{li}, r = \overline{1, n+m}, i = \overline{1, n+m}, i \neq k. \tag{7}$$

$$\bar{e}_{rk} = \frac{e_{rk}}{\alpha_{lk}}, \bar{e}_{ri} = e_{ri} - \frac{e_{rk}}{\alpha_{lk}} \alpha_{li}, r = \overline{1, n+m}, i = \overline{1, n+m}, i \neq k. \tag{8}$$

$$\bar{u}_{0j} = u_{0j} - \frac{e_{jk}}{\alpha_{lk}} \Delta_l, j = \overline{1, n+m}. \tag{9}$$

$$\bar{\Delta}_k = -\frac{\Delta_l}{\alpha_{lk}}, \bar{\Delta}_r = \Delta_r - \frac{\alpha_{rk}}{\alpha_{lk}} \Delta_l, r = \overline{1, n+m}, r \neq k. \tag{10}$$

При цьому умовою опорності базисної матриці при вводі вектору нормалі a_l обмеження $a_l u \leq c_l$ на k -у позицію базисної матриці A є виконання нерівності $\alpha_{lk} \neq 0$.

На основі приведених співвідношень можна подувати алгоритмічну схему дослідження систем (6) (при змінах в моделі). Алгоритм буде ґрунтуватись на ідеології симплекс-методу, з деякими особливостями організації ітераційного процесу. Зокрема, перехід від системи (6) до системи (5) буде проводитись послідовно заміщенням відповідних збурених рядків

¹ Кудін, В.І., Ключин, Д.А. (2003). Схеми декомпозиції великорозмірних матриць спеціальної структури при моделюванні фільтрації двофазної рідини. *Журнал обчислювальної та прикладної математики*, 2(89), 55-65.

² Кудин, В.І. Ляшко, С.І., Хритоненко, Н.В., Яценко, Ю.П. (2007). Аналіз свойств линейной системы методом псевдобазисных матриц. *Кибернетика и системный анализ*, 4, 119 – 127.

$i, i+1, i+2, \dots, i+i_0$. Це означає, що вектори нормалей гіперплощин, які утворюють рядки базисної матриці та відповідної їй оберненої матриці, будуть замінюватись відповідними “збуреними” векторами-нормаліями. На основі симплексних співвідношень (7)-(10) будуть перераховуватись наступні опорні розв’язки та обернені матриці. При збереженні властивості опорності, на ітераціях заміщення, розв’язок системи (6) буде знайдено за i_0 ітерацій. В результаті отримуємо новий базисний розв’язок та обернену матрицю.

Результатом узагальнення наведеного вище матеріалу є алгоритм визначення нового розв’язку у випадку збурення елементів базисної матриці, що дозволяє визначити зміни в обсягах валового випуску при зміні технологічних матриць еколого-економічної моделі (3).

Крок 1. Знаходимо розв’язок u_0 вихідної системи (5) та її обернену матрицю A^{-1} .

Крок 2. Збурюємо матрицю A в елементі a_{kj} у вигляді $\bar{a}_{kj} = a_{kj} + a'_{kj}$.

Крок 3. Визначаємо коефіцієнт $\alpha_{ek} = 1 + a'_{kj} \cdot e_{jk} \neq 0$, де e_{jk} – відповідний елемент матриці A^{-1} .

Крок 4. Знаходимо новий вектор-стовпець $\bar{e}_k = \frac{e_k}{\alpha_{ek}}$ матриці A .

Крок 5. Визначаємо нев’язку збуреного рядка в елементі a'_{kj} : $\Delta_e = \bar{\Delta}_k = a'_{kj} \cdot u_{0j}$, де u_{0j} – j -та компонента u_0 .

Крок 6. Знаходимо новий розв’язок на основі співвідношення $\bar{u}_0 = u_0 - \bar{e}_k \cdot \Delta_e$.

Проілюструємо запропонований алгоритм визначення об’ємів валового галузевого випуску у випадку технологічних міжгалузевих змін на умовних даних. Нехай коефіцієнти технологічних матриць еколого-економічної моделі (3) мають такі значення:

$$A_{11} = \begin{pmatrix} 0.2 & 0.1 \\ 0.3 & 0.2 \end{pmatrix}, A_{12} = \begin{pmatrix} 0.1 & 0.2 \\ 0.2 & 0.2 \end{pmatrix}, A_{21} = \begin{pmatrix} 0.1 & 0.3 \\ 0.2 & 0.3 \end{pmatrix}, A_{22} = \begin{pmatrix} 0.2 & 0.3 \\ 0.3 & 0.1 \end{pmatrix},$$

матриця витрат на обслуговування емісій парникових газів та вектори галузевого кінцевого випуску і обмеження за викидами парникових газів відповідно:

$$C = \begin{pmatrix} 0.3 & 0.2 \\ 0.1 & 0.5 \end{pmatrix}, y_1 = \begin{pmatrix} 12 \\ 23 \end{pmatrix}, y_2 = \begin{pmatrix} 5 \\ 8 \end{pmatrix}.$$

Перевіримо виконання умови продуктивності для еколого-економічної системи у випадку обраних числових даних. Блочна матриця A

$$A = \begin{pmatrix} 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0.2 \\ 0.3 & 0.2 & 0.1 & 0.2 \\ 0.1 & 0.3 & 0.2 & 0.3 \\ 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.1 \end{pmatrix}$$

очевидно є продуктивною за достатньою умовою продуктивності технологічних матриць балансових моделей леонт’євського типу. Окрім того виконується розглянута вище достатня умова продуктивності моделі (3) – нерівність $A_{21}(y_1 + Cy_2) \geq y_2$:

$$\begin{pmatrix} 9.76 \\ 11.27 \end{pmatrix} \geq \begin{pmatrix} 5 \\ 8 \end{pmatrix}.$$

Переходимо до покрокової реалізації алгоритму 1-6.

1. Знаходимо розв’язок вихідної системи, та обернену блочну технологічну матрицю:

$$u_0 = \begin{pmatrix} 38.17 \\ 60.43 \\ 32.67 \\ 30.62 \end{pmatrix}, A^{-1} = \begin{pmatrix} 1.79 & 0.73 & 0.6 & 0.76 \\ 1.08 & 2.0 & 0.74 & 0.93 \\ 1.04 & 1.32 & 1.99 & 1.19 \\ 1.1 & 1.27 & 1.04 & 1.99 \end{pmatrix}.$$

2. Припускаємо, що збурення в моделі (3) зазнає елемент $a_{21}^{11} = 0.3$, а саме збільшується на 0.1 . Останнє означає збільшення витрат продукції 2-ої галузі на одиницю випуску 1-ої галузі. Отже, $\bar{a}_{21} = 0.3 + 0.1 = 0.4$.

3. Знаходимо $\alpha_{ik} = \bar{\alpha}_{kk} = 1 + 0.1 \cdot a_{12}^{-1} = 1 + 0.1 \cdot 0.74 = 1.074$.

4. Визначаємо вектор-стовпець: $\bar{e}_2 = \begin{pmatrix} 0.73 \\ 2.0 \\ 1.32 \\ 1.27 \end{pmatrix} / 1.074 = \begin{pmatrix} 0.68 \\ 1.86 \\ 1.23 \\ 1.18 \end{pmatrix}$.

5. Розраховуємо нев'язку збуреного рядка: $\Delta_i = \bar{\Delta}_2 = 0.1 \cdot 38.17 = 3.817$.

6. Новий розв'язок отримуємо у вигляді: $\bar{u}_0 = \begin{pmatrix} 38.17 \\ 60.43 \\ 32.67 \\ 30.62 \end{pmatrix} - 3.817 \cdot \begin{pmatrix} 0.68 \\ 1.86 \\ 1.23 \\ 1.18 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 35.57 \\ 53.33 \\ 27.97 \\ 26.12 \end{pmatrix}$.

Аналіз отриманого розв'язку дозволяє зробити такі висновки. Збільшення витрат продукції 2-ої галузі на одиницю випуску 1-ої галузі в рамках балансової еколого-економічної системи (3) призводить до зменшення обсягів валового випуску 1-ї та 2-ї галузей матеріального виробництва на 2,6 та 7,1 умовних одиниць, а також обсягів утилізації парникових газів 1-го та 2-го виду на 4,7 та 4,5 умовних одиниць відповідно.

Висновки. Необхідність врахування екологічного фактору в сучасній системі подальшого розвитку цивілізації обумовлює актуальність розгляду виробничої діяльності суспільства в рамках єдиної соціо-еколого-економічної системи. При цьому важливою вимогою її існування є необхідність збалансування інтересів кожної з вказаних підсистем. Ефективним інструментом для цього слугують балансовий метод та відповідні розроблені на його основі моделі, зокрема запропонована в статті модель врахування витрат на реалізацію проектів скорочення емісій парникових газів. З метою її ефективного використання встановлено умови продуктивності та запропоновано алгоритм визначення об'ємів валових галузевих випусків у випадку зміни технологічної галузевої структури. Подальші дослідження доцільно проводити в напрямку включення додаткових економічних та екологічних обмежень, а також зміни класичних вихідних припущень щодо технологічної структури запропонованої моделі.

References

1. Ramochnaia Konventsia OON ob yzmenenyy klymata 1992. (Orhanyzatsiia ob'edynennukh natsyi). Ofytsyalnui sait Orhanyzatsyy ob'edynennukh natsyi. <<http://unfccc.int/resource/docs/convru.pdf>> (2007, mart, 05).
2. Sustainable Innovation Forum, 2016. <<http://www.cop21paris.org>> (2016, February, 05).
3. Onyshchenko, A.M., Liashenko, I.M. (2011). Metodolohiia matematychnoho modeliuвання ekonomiko-ekolohichnoi vzaiemodii v umovakh realizatsii Kiotskoho protokolu. Ekonomichna kibernetika, 4-6(70-72), 17-26.
4. Leontev, V.V. (1997). Mezhotraslevaia ekonomyka. M.: Ekonomyka.
5. Liashenko, I.M. (1999). Ekonomiko-matematychni metody ta modeli staloho rozvytku. K.: Vyshcha shkola.
6. Kudin, V.I., Kliushyn, D.A. (2003). Skhemy dekompozytsii velykorozmirnykh matryts spetsialnoi struktury pry modeliuванні filtratsii dvokhfaznoi ridyny. Zhurnal obchysluvalnoi ta prykladnoi matematyky, 2(89), 55-65.
7. Kudyn, V.Y., Liashko, S.Y., Khrytonenko, N.V., Yatsenko, Iu.P. (2007). Analiz svoistv lyneinoi systemu metodom psevdobazysnykh matryts. Kybernetika y systemnui analiz, 4, 119 – 127.