

УДК 621.181.7

Ю. В. КУРІС, канд. техн. наук

Інститут вугільних енерготехнологій НАН України, м. Київ

## ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОСИСТЕМ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ

*Оптимизация КБУ – это определение лучших из всех возможных вариантов системы для выбранного критерия её эффективности. Комплексная системная оптимизация предполагает выбор таких значений параметров системы (технологического, структурного и других), которые гарантировали бы оптимальное или близкое к оптимальному значению критерия эффективности.*

*В данной работе осуществлено дальнейшее развитие и обобщение метода эксерготопологического моделирования для КБУ.*

*Научной новизной работы есть предложенная авторами обоснованная математическая модель эффективного использования энергии биомассы в мировом энергетическом хозяйстве.*

*Оптимізація КБУ – це визначення найкращих з усіх можливих варіантів системи щодо обраного критерію її ефективності. Комплексна системна оптимізація має за мету вибір таких значень параметрів системи (технологічних, конструктивних та ін.), які забезпечували б оптимальні або близькі до оптимального значення критерію ефективності.*

*У даній роботі зроблено подальший розвиток і узагальнення методу ексерготопологічного моделювання відносно КБУ.*

*Науковою новизною роботи є запропонована авторами і обґрунтована математична модель ефективного використання енергії різних видів біомаси в світовому енергетичному господарстві.*

### Вступ

Оптимізація КБУ – це визначення найкращих з усіх можливих варіантів системи щодо обраного критерію її ефективності. Комплексна, системна оптимізація має за мету вибір таких значень параметрів системи (технологічних, конструктивних та ін.), які забезпечували б оптимальні або близькі до оптимального значення критерію ефективності

$$z_{\text{opt}} = \text{exsr}_{x_j \in R^n} \{z(x_j)\} \quad (1)$$

за обмежень

$$f_i(x_j) > 0, i = 1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

$$q_k(x_j) = 0, k = 1, 2, \dots, L, \quad (3)$$

де  $R^n$  –  $n$ -мірний дійсний векторний простір.

Неважно бачити, що сформульована задача оптимізації КБУ (1) представляє собою багатоекстремальну великорозмірну задачу дискретного нелінійного програмування [1], ускладнену обмеженнями (2), (3).

Як відомо [2], найефективнішими математичними методами у цьому випадку є методи теорії графів.

Мова теорії графів особливо ефективна у системних дослідженнях, оскільки бінарні відносини між об'єктами деякої множини зручно представляти графами, а системи містять

такі відносини між підсистемами. Перевага графових моделей полягає також у їхній гнучкості, широких можливостях і різноманітності застосування. Теоретико-графові алгоритми і засновані на них процедури пошуку керуючих рішень є в багатьох випадках значно ефективнішими, ніж інші.

Таким чином, для вирішення поставлених задач необхідно об'єднати в одному апараті методи ексергетичного аналізу енергоперетворювальних систем з математичними методами теорії графів. Такий підхід був названий ексерготопологічним [3].

Певні кроки в цьому напрямку було зроблено в останні роки в роботах [3, 4, 5], однак об'єктом застосування були системи, відмінні від КБУ.

Ці моделі, опираючись на добре розроблений математичний апарат теорії графів, дозволяють аналізувати і одержувати оптимальні компонування КБУ досить просто, не уступаючи при цьому за строгістю математичного підходу і спільності отриманих результатів іншим математичним моделям і методам.

**Основна частина**

У даній роботі зроблено подальший розвиток і узагальнення методу ексерготопологічного моделювання відносно КБУ.

Науковою новизною роботи є запропонована авторами і обґрунтована математична модель ефективного використання енергії різних видів біомаси в світовому енергетичному господарстві.

Для дослідження можливості розширеного використання енергії біомаси була розроблена математична модель, основними елементами якої є інформаційно-енергетична мережа паливо-біоенергетичного балансу (рис. 1) і база даних біоенергетичного устаткування.

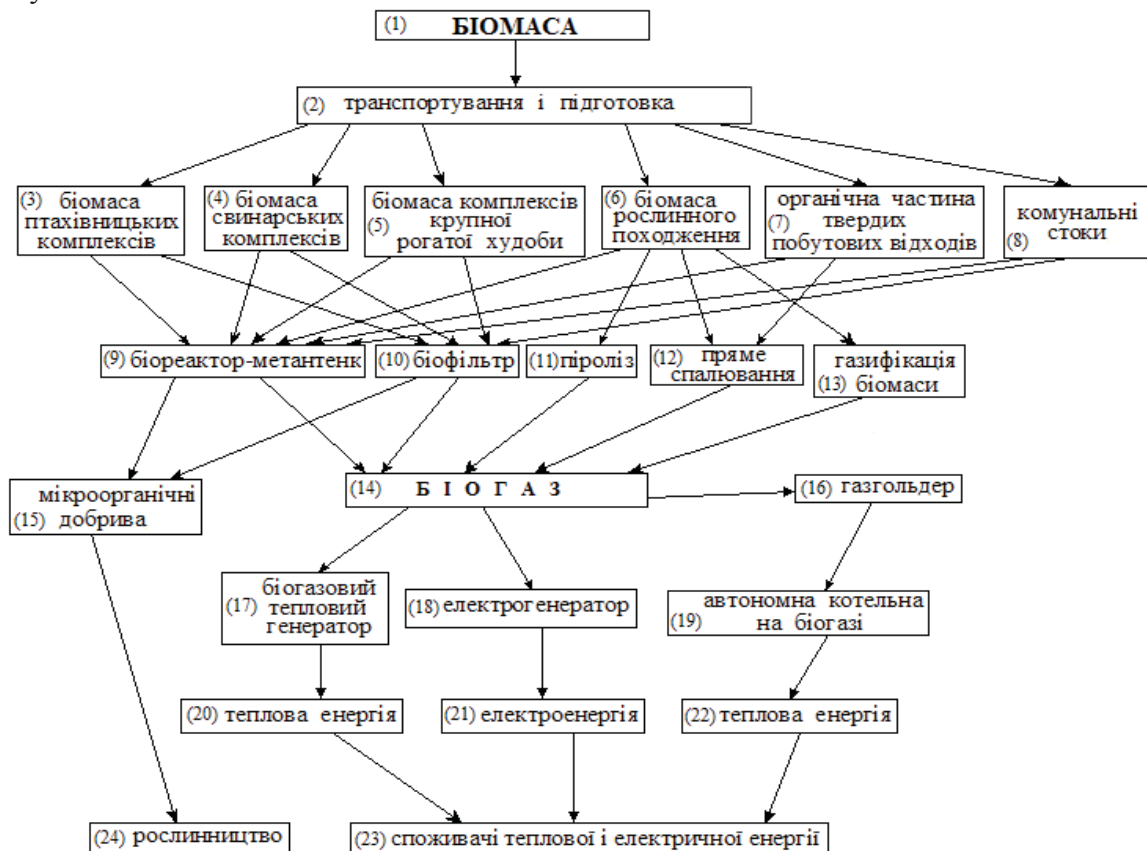


Рис. 1. Інформаційна мережа біоенергетичного балансу [6, 7]

Сформована інформаційно-енергетична мережа паливо-біоенергетичного балансу представляє енергетичне господарство у вигляді сукупності об'єктів різного типу, що обмінюються потоками енергії.

У даній запропонованій схемі об'єкти 3, 4, 5, 6, 7, 8 є постачальниками товарної біомаси в світове енергетичне господарство, а об'єкти 23, 24 – споживачами теплової і електричної енергії, а також мікроорганічних добрив. Вихідною інформацією для дослідження є дані, що характеризують енергетичний баланс на стадіях енергетичного потоку (видобуток, переробка, перетворення, транспорт, зберігання і кінцеве використання).

Стадії енергетичного потоку представлені у вузлах мережі. Лінії, що з'єднують вузли, відповідають потокам енергії між відповідними вузлами. Кожному типу вузла інформаційної мережі енергетичного балансу відповідає свій обчислювальний блок у вигляді системи нелінійних рівнянь.

Аналіз та основи оптимізації біогазової установки методами теоретико-графових побудов

Оптимізацію досліджуваних явищ потрібно засновувати на методі системного аналізу, який орієнтує дослідження на розкриття цілісності об'єкта і взаємозв'язку його основних елементів. Слід підкреслити, що властивості елементів можуть змінюватися в процесі дії системи в цілому. Тому вивчення складної системи, якою є енергозберігаюча установка, передбачає її представлення у вигляді моделі, що дозволяє виконати аналіз поведінки системи за різними зовнішніми впливами.

Проведення системного аналізу доцільно здійснювати за допомогою методів теорії графів. Теоретико-графові методи досить результативні для аналізу і синтезу систем енергозбереження [8].

Рішення цих задач неможливо без математичного моделювання. Реалізація відповідних математичних моделей на ЕОМ дозволяє проводити аналіз і пошук найобґрунтованіших проектних рішень.

Технологічну схему системи можна представити у вигляді потокового графа  $G(A, \Gamma)$ , де вершини є елементами схеми, а дуги – фізичними потоками (термодинамічні параметри, потоки маси, теплоти, енергії) між елементами.

Для аналізу енергозберігаючих систем звернемося до параметричного потокового графа (ППГ) і до ексергетичного потокового графа (ЕПГ).

Параметричний потоковий граф є топологічною моделлю системи. З побудовою ППГ створюється інформаційна схема з технологічної схеми і далі представляється в цифровій формі. Цифровим описом виступає матриця інциденцій (таблиця 1), яка повністю відображає топологічну структуру інформаційної схеми і дозволяє перенести цю структуру на мову алгебри або теорії множин.

Ексергетичний потоковий граф враховує не тільки параметри системи, але і потоки ексергії. Під ЕПГ слід розуміти граф  $E(A, \Gamma) = E(A, U)$ , множину  $A = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k\}$ , вершина якої відповідає ексергетичним втратам в окремих елементах системи, а безліч дуг

$U = \{u_1, \dots, u_i\}$ ,  $k \neq 1$  – розподілу ексергетичних потоків у системі;  $\Gamma$  – багатозначне відображення множини  $A$  в себе. ЕПГ за аналогією із ППГ представляють у матричному виді.

Оптимізація біогазової системи має за мету вибір структури технологічної схеми і складу обладнання, параметрів системи (конструктивних, термодинамічних, тепломасообмінних тощо), які забезпечили б оптимальне або близьке до оптимального значення критерію ефективності.

Для оцінки критерію оптимізації служать показники [9]:

Таблица 1

Матрица інцидентній переробки та використання біомаси

i, j	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX	XXI	XXII	XXIII	XXIV
I	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
II	0	*	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
III	0	0	*	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IV	0	0	0	*	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V	0	0	0	0	*	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VI	0	0	0	0	0	*	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VII	0	0	0	0	0	0	*	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VIII	0	0	0	0	0	0	0	*	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IX	0	0	0	0	0	0	0	0	*	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
XI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
XII	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
XIII	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
XIV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
XV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0	0	1
XVI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*	0	0	1	0	0	0	0	0
XVII	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*	0	0	1	0	0	0	0
XVIII	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*	0	0	1	0	0	0
XIX	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*	0	1	0	0	0
XX	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*	0	0	1	0
XXI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*	0	1	0
XXII	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*	1	0
XXIII	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*	0
XXIV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*

максимальна продуктивність виходу біогазу –

$$\psi_1 = \int P_6 \, d\tau; \tag{4}$$

максимальна продуктивність виходу метану –

$$\psi_2 = \int P_{\text{мет}} \, d\tau; \tag{5}$$

максимальна продуктивність виходу мулу –

$$\psi_3 = \int P_{\text{мул}} \, d\tau; \tag{6}$$

енергетична ефективність –

$$\psi_{\text{и}} = \int \left( \frac{\sum E_{\text{вих},i}}{\sum E_{\text{вх},j}} \right) d\tau; \tag{7}$$

максимальний прибуток від біоенергетичної установки –

$$\psi_s = \int (\sum \Pi_i P_i - \sum C_j X_j) d\tau, \tag{8}$$

де  $P_6, P_M, P_m$  – обсяги відповідно біогазу, метану, мулу;

$E_{\text{вих},i}$  – енергоємність продукції;

$E_{\text{вх},j}$  – сумарні витрати енергії на виробництво продукції;

$\Pi_i$  – ціна продукції;

$C_j$  – вартість  $j$ -го ресурсу;

$X_j$  – об'єм  $j$ -го ресурсу.

Складність і багатогранність процесів, що протікають у біогазовій установці, складають певні труднощі під час вирішення задачі оптимізації. У зв'язку з цим доцільно звернутися до методів теорії графів [10].

Розглянемо схему складної біогазової установки (рис. 2), на якій дана нумерація елементів системи. Цією нумерацією ми скористаємося під час побудови відповідних топологічних графів.

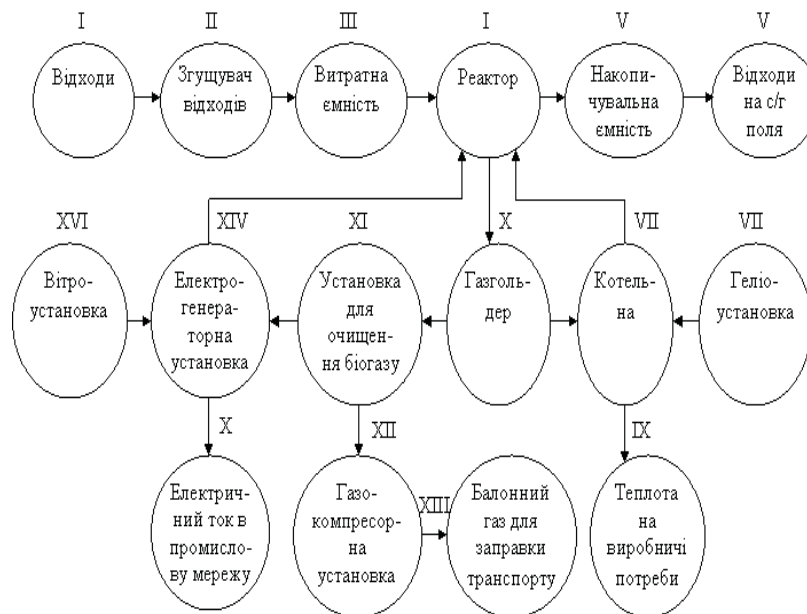
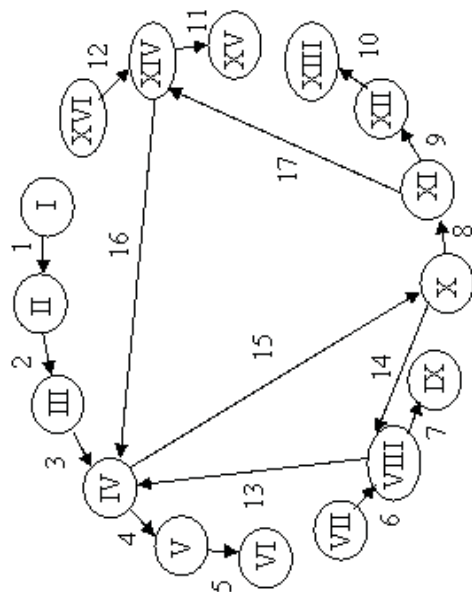


Рис. 2. Схема енергокомплексу з біогазовою установкою і газокompресорною станцією для крупних сільськогосподарських підприємств

На рис. 3 наведено топологічний параметричний граф для схеми, що зображена на рис. 2, і відповідна матриця інцидентій.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
I	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
II	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
III	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IV	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	1	1
V	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VI	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VII	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VIII	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0
IX	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	1	0	0
XI	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1
XII	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0
XIII	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
XIV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	-1	0
XV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
XVI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0

б



а

Рис. 3. Топологичный параметричный граф для схемы, що зображена на рис. 2

У біогазовій установці суттєве питання розподілу вихідної речовини (субстрату) на біогаз і на шлам, що отримують. Тому становить інтерес матеріальний баланс розглянутої системи. Матеріальний потоковий граф і відповідну матрицю інцидентій біоенергетичної установки, зображеної на рис. 2, наведено на рис. 4.

Для енергетичної оцінки слугує ексергетичний потоковий граф і матриця інцидентій (рис. 5).

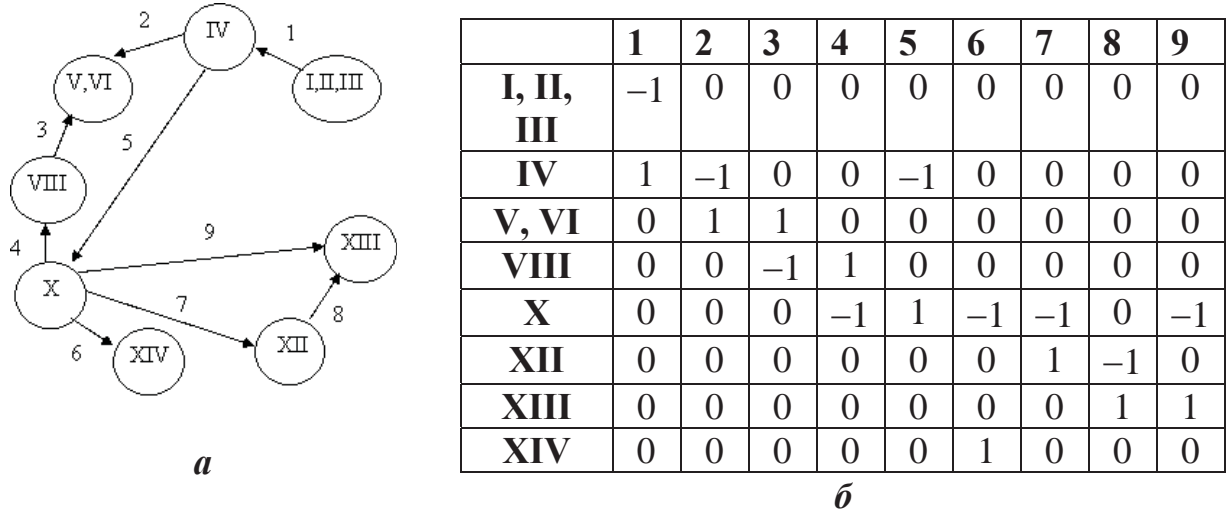


Рис. 4. Матеріальний потоковий граф (а) і матриця інцидентій схеми БГУ згідно рис. 2 (б).

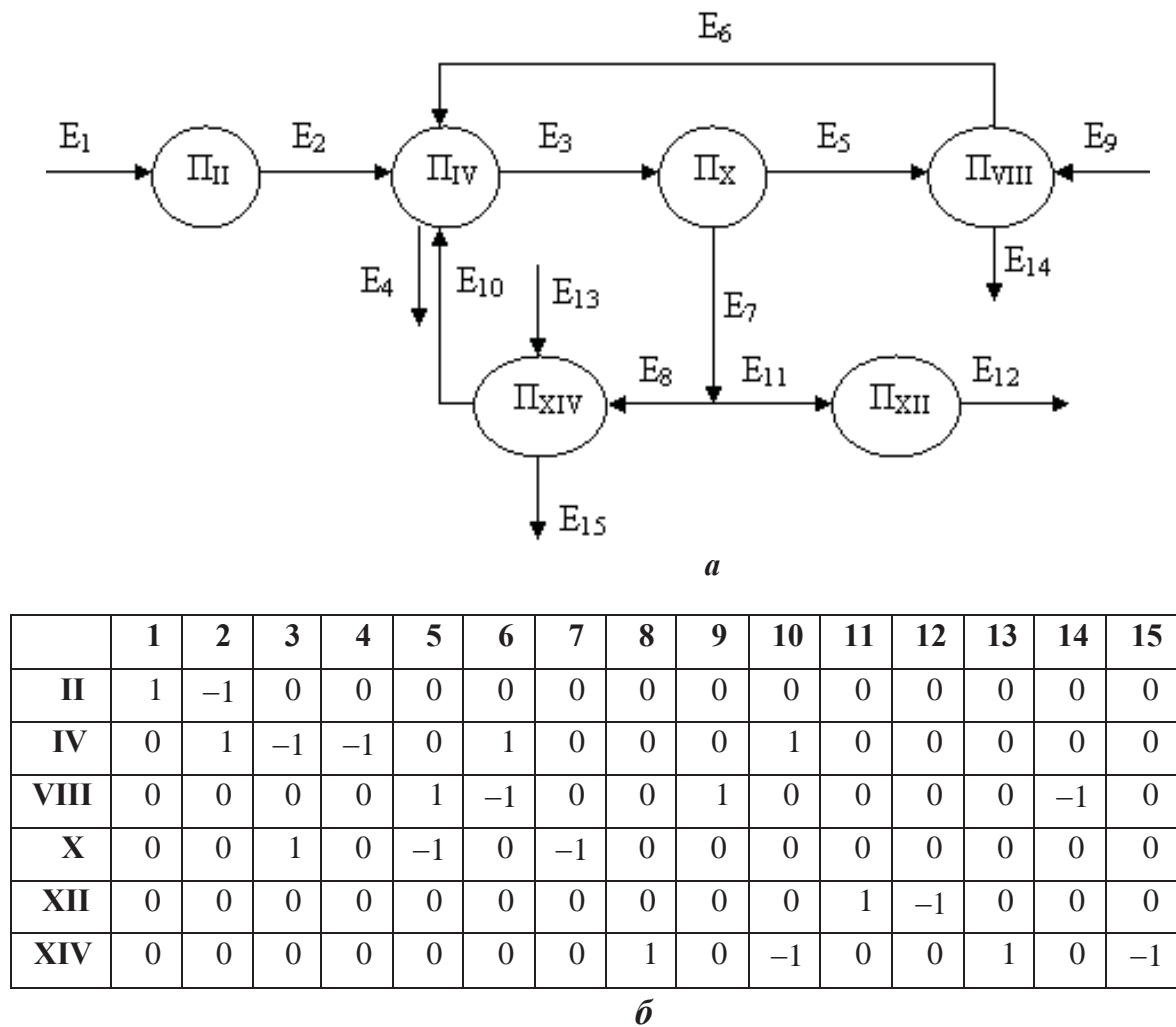


Рис. 5. Ексергетичний потоковий граф (а) і відповідна матриця інцидентій схеми по рис. 2 (б)

Наведені вище потокові графи і відповідні їм матриці інцидентій використовують наступним чином.

Скануючи матрицю інцидентій для параметричного потокового графа і визначаючи булеву змінну на своєму шляху, за допомогою ЕОМ визначають всі необхідні дані і знаходять значення параметрів у кожній вузловій точці графа, значення теплових і масових потоків і, тим самим, умови оптимальної топології схеми. Аналогічно, скануючи матрицю ексергетичного потокового графа, ЕОМ обчислює значення ексергії, ексергетичних потоків і, отже, визначає ступінь енергетичної досконалості даного варіанту системи. Аналізуючи декілька варіантів структурних і параметричних рішень схеми установки, визначають оптимальний варіант за обраним критерієм оптимальності.

У якості техніко-економічного критерію ефективності зазвичай приймають наведені та експлуатаційні витрати. Більш обґрунтованими у теперішній час є наведені витрати  $\Pi_e$ , які враховують витрачену на здійснення процесу енергію [1]:

$$\Pi_e = E_n K_n N + \frac{NC_e \tau_r}{\eta}, \quad (9)$$

де  $E_n$  – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень, 1/рік;

$K_e$  – питомі капіталовкладення, віднесені до витраченої енергії, грн/(кВт·год);

$N$  – кількість енергії, витраченої в процесі, кВт·год;

$C_e$  – вартість одиниці енергії, грн/(кВт·год);

$\tau_r$  – кількість годин роботи установки, год/рік;

$\eta$  – ККД процесу;

З рівняння (9) можна отримати вираз для енергетичних наведених витрат:

$$\Pi_{e, \text{нав}} = \frac{E_n K_e}{\tau_r} + \frac{C_e}{\eta}. \quad (10)$$

Експлуатаційні витрати рекомендується визначати пропорційно витратам енергії [11]:

$$\Pi_E = E_n K_V V + \Delta E C_e \tau_r, \quad (11)$$

де  $K_V$  – питомі капіталовкладення, віднесені до одиниці об'єму установки, грн/м<sup>3</sup>;

$V$  – об'єм установки, м<sup>3</sup>;

$\Delta E = E_{\text{вх}} - E_{\text{вих}}$  – кількість ексергії, витраченої на процес, кВт;

$C_e$  – вартість одиниці енергії, грн/(кВт·год).

## Висновки

1. Вивчено різні відомі біогазові установки з точки зору ефективності та економічності їх роботи і поданий порівняльний аналіз, що полегшує їх вибір за необхідними в конкретних обставинах параметрами.

## Список літератури

1. Bejan A. Thermal Design and Optimization / A. Bejan, G. Tsatsaronis, M. Moran. // J. Wiley. – New York, 1996.
2. Niculshin V. Exergy Efficiency of Complex Systems. Proceedings of International Conference of Ocean Technology and Energy / V. Niculshin, L. Andreev. – OTEC/DOWA, 99, Jmari, Japan. –1999. – P. 161–162.
3. Морозюк Т. В. Методы эксергоэкономики в оптимизации абсорбционных



- термотрансформаторов / Т.В. Морозюк // Пром. теплотехника. – 2000. – № 4, Т. 22. – С. 15–19;
4. Barton P. I. Dynamic optimization in a discontinuous world / P. I. Barton, R. J. Allagar, W. F. Feehery, Gal an S. // Ind. Chen. Res. – 1998. – № 37. – P. 966–981.
5. Casarosa G. Thermodynamic optimization of the operative / G. Casarosa, Casarosa G., Franco A. // Ind. G. Casarosa. Res. – 2003. – № 21. – P. 76–79.
6. Курис Ю. В. Анализ эффективности мирового энергетического и экологического использования биомассы / Ю. В. Курис, С. И. Ткаченко // Промелектро. – 2008. – № 5. – С. 35–41.
7. Курис Ю. В. Систематизация мирового энергетического и экологического использования биомассы. / Ю. В. Курис, С. И. Ткаченко // Новости энергетики. – 2009. – № 1. – С. 19–27.
8. Эткин В. А. Термодинамика неравновесных процессов переноса и преобразования энергии / В. А. Эткин – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та., 1992. – 168 с.
9. Свирежев Ю. М. О математических моделях биологических сообществ и связанных с ними задачах управления и оптимизации / Ю. М. Свирежев // Математическое моделирование в биологии. – М.: Наука, 1975. – С. 30–52.
10. Харари Ф. Теория графов / Ф. Харари – М.: Мир, 1973. – 300 с.
11. Кафаров В. В. Оптимизация теплообменных процессов и систем / В. В. Кафаров, В. П. Мешалкин, Л. В. Гурьева. – М.: Атомиздат, 1988. – 192 с.

## THEORETICAL ASPECTS OF OPTIMIZATION OF THE ENERGOСYSTEM BIOGAZOVOY SETTING

Yu. V. KURIS, Cand. Tech. Scie.

*CBU Optimization – is the best definition of all possible options for the selected criteria of its effectiveness. Integrated, system optimization aims choice of these parameters (technological, structural and others. That would ensure optimal or close to optimal value criterion of efficiency*

*These models, relying on well-developed mathematical formalism of graph theory, to analyze and obtain the optimal layout CBU quite simply, not ustupayuchy while on approach mathematical rigor and generality of the results of mathematical models and other methods.*

*This paper shows the further development and generalization of the method ekserhotopolohichnoho modeling applied to CBU.*

*Scientific novelty of this work is suggested by the authors and proved effective mathematical model of energy consumption of different types of biomass in the global energy sector.*

*Поступила в редакцию 15.04 2011 г.*