

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І СИСТЕМ

УДК 004.942:622.68

О.В. СТОГНІЙ, канд. техн. наук, **М.І. КАПЛІН**, **Т.Р. БІЛАН**,
Інститут загальної енергетики НАН України, м. Київ

ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ІМПОРТУВАННЯ ВУГІЛЛЯ В УКРАЇНУ

Запропоновано економіко-математичну модель надходження імпортованого вугілля в Україну з урахуванням цінних показників транспортування та можливостей транспортної інфраструктури України. Модель побудовано на основі поняття технологічного способу Канторовича із застосуванням мережної аналогії в межах моделі виробничого типу. Виконано оцінки оптимальних за джерелами імпорту та шляхами транспортування обсягів надходження вугільної продукції в економіку України з країн близького та далекого зарубіжжя залізничним та морським транспортом.

Ключові слова: імпортування вугільної продукції, економіко-математична модель, транспортна мережа, технологічний спосіб.

Зростання ролі вугілля в паливно-енергетичному балансі України зумовлено природно-геологічними, економічними, безпековими, соціальними чинниками. На використання досить чітко обмежених обсягів цього виду палива орієнтована інертна економічна інфраструктура нашої держави, яка розбудовувалась протягом десятиліть, виходячи з потреб економіки СРСР. Питання забезпечення економіки викопними паливними ресурсами розглядалось як вирішене раз і назавжди у зв'язку з практично необмеженими запасами природних копалин колишнього Радянського Союзу. Натомість в умовах сьогодення кардинальних змін зазнали не лише виробничі потужності підприємств, а й раніше до певної міри усталені джерела паливозабезпечення економіки, значна частка яких взагалі виявилася поза межами держави. Відчутним став дефіцит окремих видів палива у зв'язку із зростанням цін на світових паливних ринках, порушенням традиційних схем їх постачання, напруженими діловими стосунками, а подекуди й політичним протистоянням між країнами колишніх партнерів-постачальників. Відчутних змін зазнали й потреби економіки у споживанні традиційних видів палива. Наприклад, із появою новітніх технологій спалювання значно зросла

потреба у вугіллі коксівних марок, більшість з яких на території України не видобувається або має низькі споживчі характеристики, що робить вугілля власного видобутку непридатним для виробництва металургійної продукції відповідної якості. Таким чином, виникає проблема забезпечення економіки України вугіллям необхідної якості у заданих обсягах, яка може бути вирішена тільки шляхом закупівлі вугільної продукції за кордоном. Зважаючи на встановлені в минулому схеми постачання та географічну близькість, найбільші обсяги вугілля надходять в Україну з країн близького зарубіжжя. Проте із створенням вертикально-інтегрованих економічних структур, які мають у своїй власності виробничі потужності з видобутку вугілля за кордоном, природно виникають нові джерела його імпортування, зокрема, з країн далекого зарубіжжя. Тому одним із найважливіших аспектів проблеми надійного, безперебійного забезпечення потреб економіки країни у вугільній продукції є визначення раціональних, економічно обґрунтованих обсягів, джерел та напрямків її імпортування.

Модель імпортування вугілля має на меті описати, в першу чергу, шляхи надходження вугільної продукції в Україну, отже, в моделі мають бути враховані всі можливі ділянки транспортування включно з вузлами перевалки й пунктами призначення. Тому для об'єкта до-

© О.В. СТОГНІЙ, М.І. КАПЛІН, Т.Р. БІЛАН, 2012

слідження, що має такий тип і структуру, природним інструментом опису стану, а також оптимізації режимів функціонування є мережні моделі. Разом з тим виключно на етапі імпортування, тобто тільки в межах транспортних технологій, необхідно розглянути такі питання як:

- перевезення різними видами транспорту, яке одночасно розглядається в межах однієї моделі;
- різні марки та класи вугільної продукції можуть потребувати на шляху до споживача різних засобів транспортування і переробки;
- оптимізація обсягів закупівлі з різних джерел імпортування;
- оптимізація сумісного використання транспортних засобів різних видів – перевалка в портах і т. ін.

Отже, в даній задачі існують обов'язкові технологічні елементи, які не вдається врахувати в межах транспортної задачі оптимізації або чисто мережних моделей.

Таким чином, основними вимогами до моделювання імпорту вугілля є врахування: 1) мережної структури транспортних магістралей із властивими обмеженнями на їх пропускну спроможність; 2) необхідності визначення доцільних обсягів імпортування з різних джерел за різних закупівельних цін; 3) диференційованих обсягів вугільної продукції за марками й фізико-хімічними властивостями; 4) вузлів перетворення, зберігання вугілля, переходу на інші засоби транспортування – вузлів перевалки, і т. ін.

Ці особливості системи, що досліджується, разом можуть бути відтворені тільки за допомогою моделей, які не обмежують перелік технологій, які розглядаються, до перевезень транспортними магістралями, а надають змістовний опис всім технологічним ланкам, властивим будь-якій економічній системі – виробітку, перетворенню й споживанню. Разом з тим у таких моделях має бути відображена транспортна інфраструктура держави – взаємозв'язані у вузлах перевалки мережі транспортування різними видами транспорту. Тому для комплексного вирішення проблеми імпортування вугілля в Україну у даному дослідженні побудовано модель виробничого типу, що використовує для формального представлення технологічних процесів імпорту поняття технологічного способу Канторовича і, разом з тим, містить інформацію про топологію транспорт-

ної системи у специфічній структурі таких технологій.

Мережну модель імпорту вугілля, що подається співвідношеннями (1)–(6), можна сформулювати таким чином. Необхідно надати мінімум функції сумарних затрат на купівлю вугілля в країнах-експортерах та його транспортування можливими шляхами перевезень (1), за умов балансу потоків у вузлах транспортних мереж та кінцевих споживачів (2)–(4), обмежень на можливі обсяги закупівель та пропускну здатність транспортних магістралей (5), (6). Тобто маємо

$$\sum_{i \in \Omega_{експ.}} C_i X_{i, відн. експ.} + \frac{1}{2} \sum_{j, k=1}^{N_{вузлів}} C_{jk} X_{jk} \rightarrow \min \quad (1)$$

$$X_{i, відн. експ.} + \sum_{r \in \Omega_{i, вх}} X_{ir, вх} - X_{i, \Sigma} = 0, \quad i=1, N_{вузлів}; \quad (2)$$

$$g_i X_{i, \Sigma} - \sum_{r \in \Omega_{i, вих}} X_{ir, вих} = B_{i, имп}, \quad i=1, N_{вузлів}; \quad (3)$$

$$-X_{ir, вих} \Big|_{r \in \Omega_{i, вих}} + g_r X_{kr, вих} \Big|_{r \in \Omega_{k, вих}} = 0, \quad (4)$$

$$r=1, N_{трансп. магістр.}$$

$$X_{i, відн. експ.}^{min} \leq X_{i, відн. експ.} \leq X_{i, відн. експ.}^{max}, \quad i \in \Omega_{експ.}, \quad (5)$$

$$X_l \leq X_l^{max}, \quad l=1, N_{трансп. магістр.} \quad (6)$$

Змінними моделі є обсяги вугілля від джерел імпорту за розрахунковий період, а також його транспортні потоки в лініях мережі шляхів постачання.

У співвідношеннях (1) – (6) введено такі позначення:

$X_{i, відн. експ.}$ – обсяг вугілля, відпущеного у країні-експортері в i -му вузлі транспортної мережі;

X_{ik} – обсяг вугілля, що транспортується лінією між i -м та k -м вузлами транспортної мережі;

$X_{ir, вх}, X_{ir, вих}$ – вхідні та вихідні потоки вугілля в i -му вузлі перевантаження транспортної мережі;

$X_{i, \Sigma}$ – загальний обсяг вугілля, що надходить в i -й вузол перевантаження – множина ребер з вхідними потоками для вузла i ;

$\Omega_{i, вих}, \Omega_{i, вх}$ – множина ребер з вихідними та вхідними потоками для i -го вузла транспортної мережі відповідно;

$B_{i, имп}$ – обсяг імпортованого вугілля в i -му вузлі кінцевого постачання в країні-імпортері;

$X_{i, \text{відп. експ.}}^{\min}$, $X_{i, \text{відп. експ.}}^{\max}$ – обсяг мінімально та максимально можливого відпуску (закупівлі) вугілля в i -му вузлі транспортної мережі в країні-експортері відповідно;

X_r^{\max} – пропускна здатність l -ї лінії транспортної мережі – максимальний обсяг вугілля, який може бути перевезений l -ю лінією за розрахунковий період;

g_r , g_i – технологічні коефіцієнти витрат (втрат) вугілля при транспортуванні r -ю лінією транспортної мережі та в i -му вузлі перевантаження чи кінцевого постачання, відповідно;

$\Omega_{\text{експ.}}$ – множина вузлів транспортної мережі, в яких здійснюється закупівля вугілля, вузлів країн-експортерів;

C_i , C_{jk} – ціна закупівлі імпортованого вугілля у вузлі i транспортної мережі в країні-експортері, вартість перевезень по шляху, що з'єднує j -й та k -й вузли відповідно.

Якщо позначити номер транспортної магістралі, що зв'яже вузли j і k через r , то цільова функція задачі (1) буде мати вигляд

$$\sum_{i \in \Omega_{\text{експ.}}} C_i X_{i, \text{відп. експ.}} + \sum_{r=1}^{N_{\text{трансп. маістр.}}} C_r X_r \rightarrow \min, \quad (7)$$

де X_r – обсяг вугілля, що транспортується r -ю лінією транспортної мережі; C_r – вартість перевезень r -ю лінією транспортної мережі.

Структура матриці коефіцієнтів рівнянь (2) – (4) моделі забезпечує, з одного боку, баланс транспортних потоків у мережі за рахунок врахування інцидентності ліній відповідним вузлам, а з іншого боку, структуру технологічного способу Канторовича моделі виробничого типу. Подання балансу вузла двома рівняннями викликане саме вимогами збереження структури техспособу, тобто виділення в кожному стовпчику технологічної матриці продуктів виробітку й споживання. Цей підхід [1, 2] виявився важливим як з технологічної, так і економічної точки зору. Це дало змогу врахувати технологічні витрати вузла, не надаючи його деталізовану еквівалентну схему (схему заміщення) і, водночас, приписати вузлу ціновий показник в силу визначення техспособу за Канторовичем [3, 4].

За допомогою моделі (1) – (7) у даній роботі виконано розрахунки оптимальних за джерелами імпортування та шляхами транспортування обсягів надходження вугільної продукції в економіку України при фіксованому загальному обсязі імпорту.

Схема мережі надходження вугілля в Україну зображена на рисунку. Основні джерела постачання – Російська Федерація та Казахстан, а також ПАР, Австралія, США. Постачання може здійснюватися суднами класу “Панамакс” і “Кейпсайз”.

За оцінками фахівців та споживачів коксівного вугілля, постачання вантажів з Балтимору (США) суднами класу “Панамакс” збільшує ціну кожної тонни на 27 – 30 у.о., тоді як використання суден класу “Кейпсайз” дозволяє знизити видатки на 10 – 15% [5].

Сьогодні морські торговельні порти України не здатні приймати судна класу “Кейпсайз” із повним навантаженням у стані повної осадки. Існує практика часткового розвантаження судна на Керченському рейді до необхідного рівня осадки, після чого судно повністю розвантажується на вугільних терміналах “ТІС-Вугілля”, причалах портів “Південний” і Маріуполь [6].

Дальність морського шляху між портами можливих експортерів і вугільними терміналами в Україні розраховано за допомогою мережного сервісу [7]. У цих розрахунках було враховано особливості роботи інших портів світу, зокрема те, що найближчі порти США не мають можливості працювати із суднами класу “Кейпсайз”.

З Російської Федерації в Україну вугілля надходить з Кузнецького та Печорського басейнів, а також із Східного Донбасу [8].

Найбільший обсяг закупівель імпортованого вугілля в Казахстані припадає на Карагандинську та Павлодарську області [9]. У модельних розрахунках пунктами постачання з Казахстану вибрано Екібастуз та Павлодар.

Станціями призначення перевезень вугілля залізничним транспортом вибрано Кривий Ріг, Авдіївку та Ровеньки.

За допомогою мережного сервісу розрахунків відстані та вартості залізничних вантажних перевезень між станціями, що знаходиться в g -зоні доменних імен [10], було визначено маршрут та вартість транспортування між станціями постачальника та станціями кінцевого призначення.

Загальний обсяг палива, який може бути отриманий з дальнього зарубіжжя через транспортну магістраль r , що відповідає морському шляху транспортування, знаходиться як

$$V_r = D_r \cdot n_r$$

де n_r – кількість можливих рейсів лінією r за розрахунковий період T ; D – дедвейт судна, тис. т.

Загальний перелік вартостей перевезення вугілля відомими шляхами транспортування без врахування оренди

Шлях перевезення	Вартість перевезення, у.о./тонну	Вартість перевезення, у.о./тонну, мінімальна ціна	Вартість перевезення, у.о./тонну, максимальна ціна
Екібастуз – Тобол – Південно – Уральська	12,10	12,10	12,10
Павлодар – Тобол – Південно – Уральська	13,50	13,50	13,50
Кемерово – Соловей – Південна	48,00	48,00	48,00
Воркута – Соловей – Південна	40,40	40,40	40,40
Ростов – Успенська – Донецька	7,64	7,64	7,64
Тобол – Південно – Уральська – Соловей – Південна	67,60	67,60	67,60
Соловей – Південна – Ровеньки	7,00	7,00	7,00
Соловей – Південна – Кривий Ріг	9,20	9,20	9,20
Соловей – Південна – Авдіївка	5,70	5,70	5,70
США – Україна – Панамакс*	27-30	27,00	30,00
Австралія – Україна – Панамакс	30-33	30,00	33,00
Австралія – Україна – Кейпсайз (двт 100 тис. т)	30-33	30,00	33,00
Австралія – Україна – Кейпсайз (двт 150 тис. т)	28-30	28,00	30,00
ПАР – Україна – Панамакс**	27-30	27,00	30,00
ПАР – Україна – Кейпсайз (двт 100 тис. т)	27-30	27,00	30,00
ПАР – Україна – Кейпсайз (двт 150 тис. т)	24-27	24,00	27,00
Керч – Південний***	12,00	12,00	12,00
Керч – Маріуполь	12,00	12,00	12,00
Успенська – Донецька – Кривий Ріг	8,50	8,50	8,50
Примітки:			
* - для морських перевезень вартість перевезення – ціна фрахту судна;			
** - за відсутності даних, ціна фрахту судна класу Панамакс з ПАР встановлена на рівні цін фрахту такого самого судна з США на основі того, що відстань між портами майже однакова;			
*** - вартість складається з ціни перевалки на Керченському рейді та в портах. Вартість перевезення в межах України не врахована;			
**** - обмінний курс грн/у.о. НБУ		8,00.	

До складу сумарних витрат на транспортування входять: оренда судна на розрахунковий період та ціна фрахту, яка змінюється залежно від завантаженості судна:

$$Z_r = A_r \cdot T + \Phi_r \cdot V_r,$$

де A_r – вартість оренди судна, тис. у.о./добу; Φ_r – ціна фрахту судна, у.о./тонну.

Таким чином, вартість перевезення однієї тонни палива ділянкою i транспортної мережі, що відповідає морському шляху транспортування, розраховується за формулою

$$C_r = \frac{Z_r}{V_r} = \frac{A_r \cdot T + \Phi_r \cdot V_r}{V_r} = \frac{A_r \cdot T}{D_r \cdot n_r} + \Phi. \quad (7)$$

Формула (8) дозволяє отримати вартість перевезення 1 тонни вугілля суднами кожного класу. Використані в модельних розрахунках ціни на залізничні перевезення, отримані з інформаційних джерел залізничного транспорту, разом з вартостями перевезень морським шляхом без врахування оренди суден зведено до таблиці.

Нижче наведено результати модельних розрахунків розподілу обсягів імпорту вугільної продукції між джерелами імпортування та шляхами її можливого постачання в Україну.

Загальний обсяг імпортування взято 10 млн т. У першому розрахунку, що є чисто ілюстративним, обсяги імпортування не обмежувались

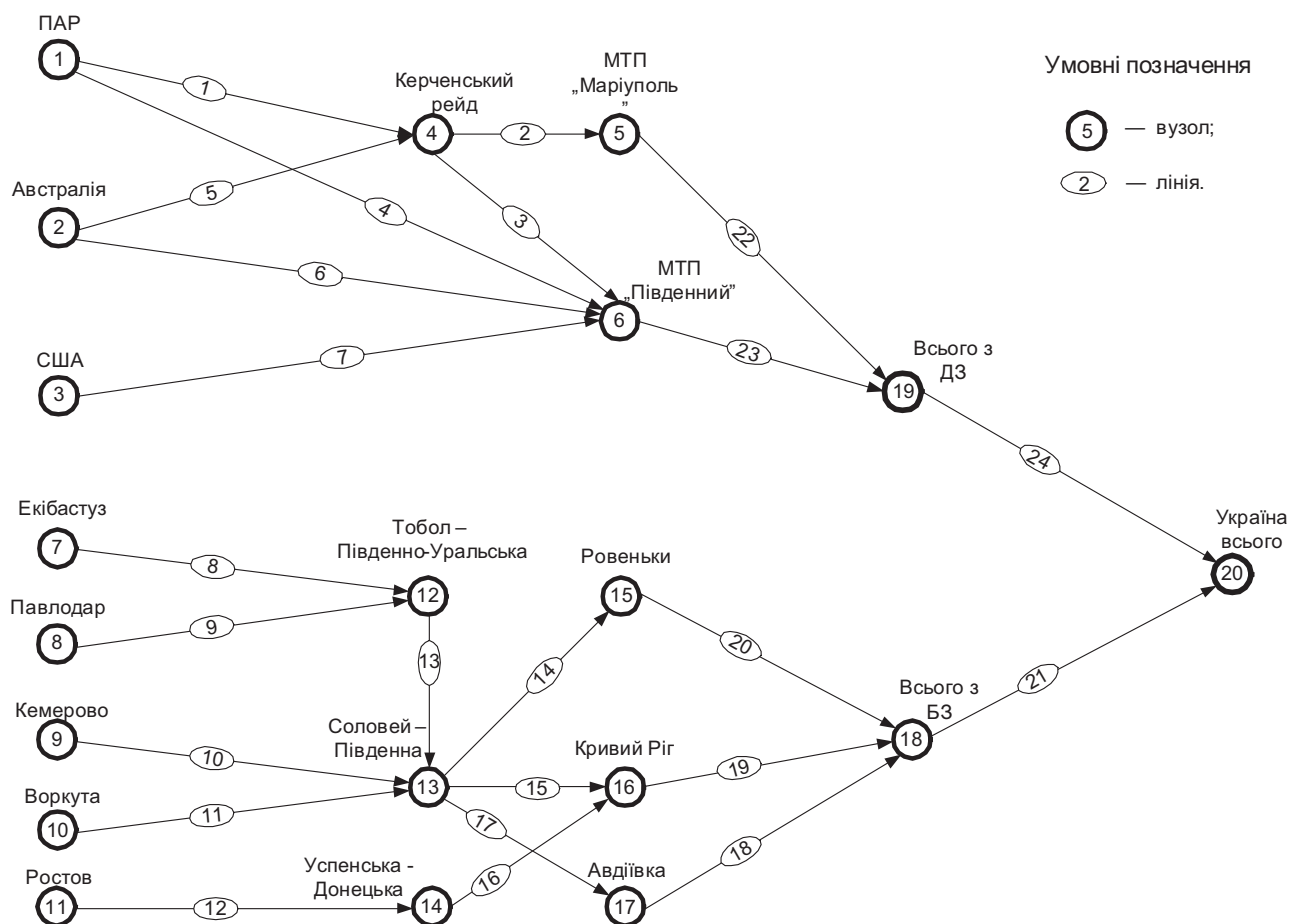


Схема транспортних магістралей імпортування вугілля в Україну морським шляхом з країн далекого зарубіжжя (ДЗ) і залізничним транспортом з країн близького зарубіжжя (БЗ)

згори. У цьому випадку весь обсяг вугілля постачається з Ростова, транспортується лінією 12, див. рисунок, до станції Успенська–Донецька, після чого лінією 16 потрапляє до Кривого Рогу. Далі у моделі цей обсяг вугілля надходить до уявного вузла 18 (Всього з БЗ), в якому підсумовуються потоки вугілля з близького зарубіжжя. Результат підсумовування обсягів з близького зарубіжжя лінією 21 надходить до вузла 20 (Україна всього), в якому підсумовуються обсяги імпорту з близького та дальнього зарубіжжя. Цей результат є очевидним, оскільки ціна купівлі у вузлі 11 (Ростов) є найнижчою в мережі і, підсумовуючись з вартостями транспортування лініями 12 та 16, утворює найменше можливе значення для всіх можливих маршрутів імпортування вугілля.

У другому розрахунку обмежено загальний обсяг імпортування з країн ближнього зарубіжжя на рівні 3 млн т. Як і слід було очікувати, весь цей обсяг було доставлено з Ростова, ана-

логічно до розрахунку №1. Другу частину обсягу імпортовано з далекого зарубіжжя. При цьому країною-експортером, незважаючи на рівність закупівельних цін для всіх країн, що розглядаються, є ПАР, оскільки сумарна вартість купівлі і транспортування є найнижчою для цього джерела та відповідного йому шляху імпортування.

У третьому розрахунку накладено обмеження згори на обсяги вугілля, що закуповувались в країнах ближнього зарубіжжя. Зокрема, у Ростові на рівні 1,5 млн т, у Воркуті 600 тис. т, у Кемерово 200 тис. т, у Павлодарі 2 тис. т. За таких умов залишковий обсяг вугілля, незважаючи на можливість дешевшої купівлі у Казахстані, було постачено з ПАР. Це пояснюється тим, що постачання вугілля з Казахстану відбувається транспортними магістралями 8 та 9, після чого весь цей обсяг з необхідністю має бути перевезений лінією 13, а потім лінією 15 до Кривого Рогу. Таким чином, сумарна вартість

перевезення з Казахстану до України значно перевищує відповідну вартість, наприклад, з ПАР, вузол 1, для шляху перевезення лінією 4.

У четвертому розрахунку, порівняно з третім, введено додаткове обмеження на обсяг постачання з ПАР. При цьому залишковий обсяг вугілля, приблизно 5,8 млн т, закуплено у США та перевезено лінією 7.

У дослідженнях, результати яких наведено вище, де розглядалося обмежене число джерел закупівлі імпортованого вугілля, не було враховано пропускних здатностей транспортних магістралей.

Проте розроблена модель імпортування вугілля з близького та далекого зарубіжжя залізничним транспортом та морським шляхом довела здатність вірно розподіляти обсяги імпортованої вугільної продукції між країнами-експортерами та шляхами постачання за критерієм сумарних витрат.

ВИСНОВКИ

Мережну модель імпортування вугілля в Україну побудовано на основі подання вузлів і транспортних магістралей системи постачання вугільної продукції у вигляді технологічних способів Канторовича економіко-математичної моделі виробничого типу. Це дозволило визначити доцільні обсяги закупівлі в країнах-експортерах і шляхи транспортування із врахуванням наявної потреби та обсягів власного видобутку.

Розрахунки оптимальної структури імпорту за допомогою моделі показують, що:

– за відсутності обмежень на обсяги закупівлі та наявних цін купівлі в країнах-експортерах і перевезень весь обсяг вугілля постачається з Російської Федерації;

– при обмеженні обсягу імпорту з Росії на рівні 3 млн т решта необхідного обсягу імпортується з ПАР. Це пояснюється найнижчою сумарною вартістю купівлі і транспортування саме для цього джерела та відповідного йому шляху імпортування;

– при встановленні обмежень на обсяги купівлі вугілля в Ростові – 1,5 млн т, Воркуті – 600 тис. т, Кемерово – 200 тис. т, Павлодарі – 2 тис. т залишковий обсяг вугілля постачається з ПАР. Модельний розрахунок показує, що сумарна вартість перевезення з Казахстану до України в цьому випадку значно перевищує

відповідну вартість імпортування з ПАР морським шляхом; додаткове обмеження на обсяг постачання з ПАР приводить до необхідності закупівлі 5,8 млн т вугілля у США.

1. *Новосельцев О.В.* Балансово-оптимізаційна модель взаємозв'язаних систем транспортування і розподілу паливно-енергетичних ресурсів в контексті загальноенергетичних балансів країни / О.В. Новосельцев, М.І. Каплін // Проблеми загальної енергетики. – 2009. – № 20. – С. 62–68.
2. *Костюк В. О.* Структурна будова та розрахункові основи економіко-математичної моделі двомережної системи транспортування й розподілу енергетичних продуктів підприємства водопостачання і водовідведення / В. О. Костюк, М. І. Каплін, В. Г. Загурський, В. П. Сидоренко // Проблеми загальної енергетики. – 2010. – Вип. 1(21). – С. 54–58.
3. *Koopmans T.C.* Analysis of production as an efficient combination of activities / T.C. Koopmans // Cowles Commission Monograph No 13: Activity analysis of production and allocation. – New York: Wiley, 1951. – P. 33–97.
4. *Канторович Л.В.* Экономический расчет наилучшего использования ресурсов / Л.В. Канторович. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 347 с.
5. *Герасимова Е.* Вся правда о ТИС. Искомая глубина [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://pravda.tis.ua/pravda/?p=5273> – Назва з екрану.
6. *Ильинский К.* Явление “кейпсайзов” Украине // Порты Украины. – 2010. – № 9. – С. 16–20.
7. *Расстояния между портами.* Расчет расстояний маршрутов между морскими портами [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.searates.com/ru/reference/portdistance/?fcity1=11902&fcity2=409&speed=7&ccode=6501> – Назва з екрану.
8. *Основные показатели маршрутов экспортных перевозок угля из РФ в ноябре* // Промышленные грузы. – 2009. – № 24(198-199). – С. 49.
9. *Обзор угольной промышленности Казахстана* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://energo45.ru/ugol/articles/2329/> – Назва з екрану.
10. *ЖД-тариф on-line.* Расчет железнодорожного тарифа on-line. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.alta.ru/railonline.php> – Назва з екрану.

Надійшла до редколегії 17.04.2012