УДК 656.073

А. І. Кузьменко, кандидат технічних наук,
доцент кафедри транспортних
систем та технологій Університету
митної справи та фінансів
М. П. Коциловський, студент
Університету митної справи та фінансів

УДОСКОНАЛЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ РУХУ ВАНТАЖОПОТОКІВ У ТРАНСПОРТНІЙ СИСТЕМІ УКРАЇНИ

Проаналізовано роботу транспортної системи України та змодельовано оптимізовані вантажопотоки у транспортній мережі, витрати на переміщення яких будуть мінімальними.

Ключові слова: *транспортна система; оптимізація; вантажопотік; транспортна мережа.*

Analysis of the transport system of Ukraine and modeled optimized cargo traffic in the transport network, the cost of moving them would be minimal.

Key words: *transport system; optimization; cargo flow; transport network.*

Постановка проблеми. Сучасну цивілізацію важко уявити без розвиненої транспортної системи. Транспортні операції забезпечують обмін сировиною та матеріалами, що необхідні для повноцінного функціонування промисловості.

Транспортній системі властиві риси, характерні для будь-якої іншої виробничої системи. Але порівняно з іншими галузями народного господарства транспорт має низку специфічних особливостей, що пов'язані з характером виробничого процесу.

Особливість функціонування будь-якої транспортної системи полягає в тому, що вона не створює жодного матеріального продукту, її результатом є сам процес переміщення пасажирів і вантажів [1]. Слід зазначити, що транспортна продукція не взаємозамінна. Перевиконання плану перевезення вантажу між одними пунктами не компенсує недовиконання перевезень цього вантажу між іншими пунктами. Масштаби діяльності галузі, розподіл об'єктів і суб'єктів діяльності, динаміка характеру виробничого процесу, а також велика кількість випадкових чинників – усе це ускладнює процес керування транспортною системою. Наявність відомчої роз'єднаності не дозволяє достатньою оптимізувати транспортний процес. Неналежна координація роботи різних видів транспорту призводить до нераціональних перевезень, неефективного використання транспортних засобів, зниження швидкості перевезень. Затримки вантажів та простої рухомого складу в транспортних вузлах часто компенсують економію, одержану за рахунок оптимізації перевезень у межах одного окремого виду транспорту [2]. Тому порушується проблема пошуку організації ефективної взаємодії елементів внутрішнього середовища транспортно-дорожнього комплексу з урахуванням екологічності, надійності та безпеки транспортного обслуговування. У зв'язку з цим актуальна тематика даної статті, присвяченої пошуку найефективнішого способу перевезення між постачальниками та споживачами за мінімальних витрат

© А. І. Кузьменко, М. П. Коциловський, 2015

на транспортування. У статті комплексно досліджується функціонування різних видів транспорту у межах транспортної системи та моделювання оптимальних транспортних потоків у ній. Для цього сформульовано низку задач, а саме подання транспортної мережі України у вигляді графу, формалізація процесу переміщення вантажопотоків, здійснення агрегування постачальників і споживачів, визначення оптимального опорного плану за допомогою методу найменшої вартості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Над завданням оптимізації вантажних перевезень та підвищення ефективності функціонування транспортних систем працювали такі дослідники, як Л. В. Майборода, А. І. Воркут, М. Г. Босняк, Є. К. Вільковський, Є. В. Нагорний, А. А. Смєхов, Г. С. Прокудін, Н. А. Соломатин, І. П. Манжула, Б. В. Черкаський, Е. І. Позамантір, Г. Е. Мойсеєнко, Є. А. Дініц, В. І. Савін, Е. А. Мухачова та ін.

Зокрема, у працях Г. Е. Мойсеєнка [3] та Б. В. Черкаського [4] розглядаються проблеми організації транспортних потоків прямими алгоритмами задач із 20 000 вершин, 450 000 дуг, а в дослідженні Є. А. Дініца − розв'язання однієї задачі з 3000 вершин та 35 000 дуг [5]. Такий підхід сприяє підвищенню ефективності перевезень у глобальних транспортних мережах. Але за такої кількості елементів розмір періоду планування значно перевищує тривалість транспортних операцій, тому він нерентабельний.

Своєю чергою, в дослідженнях Е. І. Позамантіра [6] з цією ж метою запропоновано модифікацію методу Белмана–Форда, що скорочує загальну кількість додавань і порівнянь для визначення найкоротшого шляху між вершинами приблизно в чотири рази. Проте такий підхід не розрахований на мінімальну вартість перевезення, отже, не вважається оптимальним.

Н. А. Соломатін використав у своїй праці так званий "алгоритм дефекту", що дозволяє розв'язувати задачі про транспортний потік мінімальної вартості досить загального вигляду [7], але в цій статті досліджувався лише один вид транспорту.

Аналіз роботи транспортної системи України виявив низку недоліків у її функціонуванні. Він також свідчить про необхідність підвищення ефективності вантажних перевезень. Таким чином, ставиться завдання комплексного дослідження функціонування різних видів транспорту в межах транспортної системи та моделювання оптимальних транспортних потоків у ній. Для цього необхідно виконати такі завдання: подати транспортну мережу України у вигляді графу, формалізувати процес переміщення вантажопотоків, здійснити агрегування постачальників і споживачів, визначити оптимальний опорний план за допомогою методу найменшої вартості.

Мета статті − моделювання оптимізованого вантажопотоку на транспортній мережі, витрати на переміщення якого будуть мінімальними.

Виклад основного матеріалу. Основу транспортної системи України становить транспортна мережа: залізничні та автомобільні дороги, внутрішні водні шляхи, повітряні лінії, трубопровідні магістралі, залізничні станції, морські й річкові порти, шлюзи, аеродроми, пристані, насосні станції тощо. У зв'язку з цим у даній статті модель транспортної мережі єдиної транспортної системи України розглядалась як граф $G(K, A)$, множина вершин K якого являє собою транспортні вузли (станції, порти тощо), а множина дуг A − ділянки шляхів переміщення транспортних потоків (рухомого складу, вантажів, пасажирів) із пунктів відправлення до пунктів призначення. Вершини мережі відповідають пунктам виробництва і споживання продукції, складам для збереження вантажів і пунктам зосередження транспортних засобів. Дугам мережі властиві такі характеристики, як

протяжність, пропускна спроможність, витрати на переміщення транспортних засобів тощо. Якщо ж переміщення транспортних засобів між пунктами може відбуватися лише в одному напрямку, дуга транспортної мережі називається орієнтованою, у противному разі − неорієнтованою.

Для зображення вершин (або вузлів) орієнтованих і неорієнтованих дуг використовуються відповідно кола, лінії зі стрілками і лінії без стрілок. У більшості випадків можна замінити одну неорієнтовану дугу двома орієнтованими і напроти спрямованими дугами [8]. У зв'язку з розподілом єдиної транспортної системи України на підсистеми, що відповідають окремим видам транспорту, транспортна мережа *G (K, A)* розпадається на низку окремих підмереж $G^M (K^M, A^M)$, що обслуговуються різноманітними видами транспорту $M = 1,..., \overline{M}$. Ці підмережі мають загальні вершини, що потрапляють на транспортні вузли, у яких відбувається перевалювання вантажів з одного виду транспорту на інший [9]. Для зручності побудови моделей планування перевезень вантажів кожен вузол реальної транспортної мережі, в якому відбувається взаємодія декількох видів транспорту, можна уявити в графі *G (K, A)* у вигляді декількох вершин, кожна з яких відповідає окремому виду транспорту. Ці вершини сполучені між собою парою напроти орієнтованих дуг, що означають перевалювання вантажів з одного виду транспорту на інший.

У загальному випадку транспортна мережа являє собою мультиграф (граф із декількома дугами між однією парою вершин), що містить цикли.

Вершини, в яких зароджуються транспортні потоки, називаються "джерелами", а вершини, в яких вони поглинаються, − "стоками". Окремі об'єкти, що переміщуються, або "протікають", із пунктів зародження транспортних потоків у пункти їхнього поглинання, називаються "одиницями потоку".

Використовуватимемо символ $k_i \in K$ для позначення вершин, $i = 1,..., n$ для позначення графу *G (K, A)* і символ $(i, j) \in A$ для позначення орієнтованої дуги, що веде з k_i, до k_j – Упорядкована послідовність вершин і спрямованих дуг мережі k_1 (1, 2), k_2 (2, 3),…, k_{n-1}, (n–1, n), k_n така, що кінець попередньої дуги є початком наступної, називається шляхом (або маршрутом), що веде з вершини k_1 у вершину k_n. При $k_1 = k_n$ послідовність називається орієнтованим циклом, або кільцевим маршрутом. Якщо будь-які дві вершини мережі можна з'єднати шляхом, то мережа називається зв'язаною. Якщо мережа незв'язана, то її можна розбити на зв'язкові підмережі або зв'язні компоненти.

Для аналізованого планового періоду було задано певну кількість вантажу, який потрібно відправити або доставити в ті чи інші вузли мережі *G (K, A)*.

Унаслідок надзвичайно великої розмірності мережі *G (K, A)* важливими проблемами, що виникають під час оптимального планування перевезень, є агрегування (об'єднання вузлів мережі й дуг) для скорочення їх кількості – декомпозиція (розбивка мережі *G (K, A)* на підмережі) для скорочення розмірності розв'язання задачі [10].

Найкраща мережа, в якій виділені всі постачальники і споживачі вантажів. Теоретично це підвищує точність планових розрахунків. Проте кількість постачальників і споживачів може досягати десятків, а інколи навіть сотень тисяч, що робить розрахунок перевезень за такою мережею неможливим без агрегування. Найприйнятнішим слід вважати агрегування постачальників і споживачів за адміністративно-територіальною ознакою [11]. Це означає, що як пункт споживання (або виробництва) обирається або адміністративний центр регіону (області) або деякий умовний пункт. При цьому за основу можна взяти наявний розподіл транспортної мережі на мережі економічних районів, областей. Основу єдиної транспортної мережі становить магістральна

мережа, через яку відбувається обмін продукцією між економічними районами (регіонами). Вона є мережею досить високого ступеня агрегування, а нижчий ступінь укрупнення – магістральна мережа значного економічного району, в якому обмін вантажами здійснюється між низовими територіально-виробничими комплексами. На рис. 1 подано фрагмент транспортної мережі України, що досліджувався у даній статті.

На основних видах транспорту, крім трубопровідного, транспортний процес має дискретний характер, тобто визначена кількість вантажів (пасажирів) і рухомого складу відправляються в окремі моменти часу.

У тих випадках, коли розмір періоду планування значно перевищує тривалість транспортних операцій, можна не враховувати позицію кожного об'єкта, що переміщується, в окремі моменти часу й перейти до розгляду деякого стаціонарного безупинного транспортного потоку.

Під час оперативного планування і регулювання тривалість транспортних операцій стає порівнюваною з періодом планування й регулювання, необхідно розглядати динамічні потоки вантажів, пасажирів і транспортних засобів.

Усі транспортні потоки, що існують на транспортній мережі, поділяються на декілька основних груп: потоки вантажів, потоки контейнерів, у яких містяться вантажі, потоки транспортних засобів, пасажиропотоки тощо.

Кожен із цих потоків може бути, у свою чергу, розподілений на підгрупи відповідно до роду вантажу, типу транспортних засобів і т. д. У даній статті розглядається потік вантажів.

Одним із ключових чинників, що впливає на формування собівартості перевезення вантажів між відправником та одержувачем, виступає шлях між ними. У табл. 1 зображено відстані між обласними центрами України, які були обрані для організації перевезення вантажу, а на рис. 2 – схема всіх можливих варіантів доставки вантажу (граф *G (K, A)*).

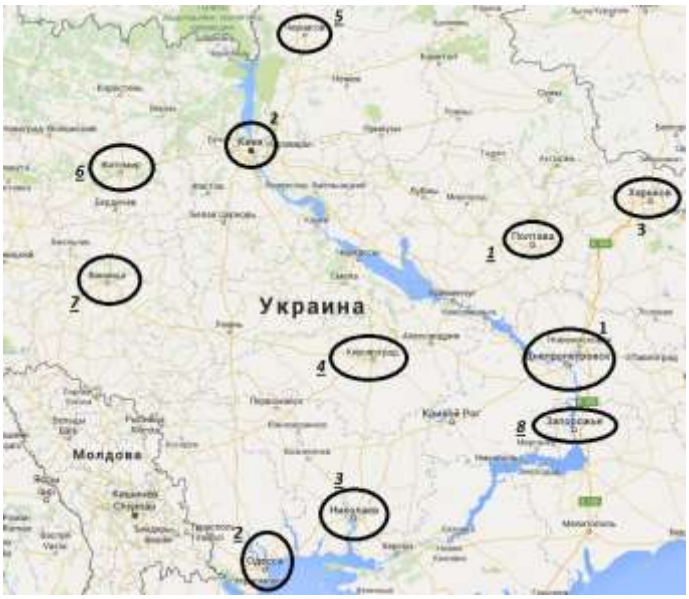


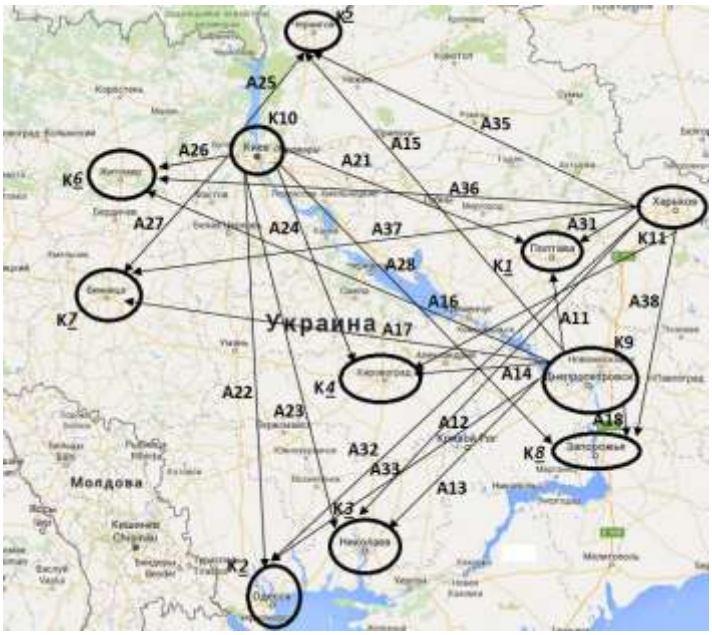
Рис. 1. Фрагмент транспортної мережі України

Вартість доставки вантажу з пунктів відправлення до пунктів отримання розрахована на основі відстаней між ними з розрахунку 1 км = 2 у. о. та задана матрицею тарифів (табл. 2).

Таблиця 1

Таблиця відстаней між вантажовідправниками та вантажоодержувачами

	Полтава К1	Одеса К2	Миколаїв К3	Кіровоград К4	Чернігів К5	Житомир К6	Вінниця К7	Запоріжжя К8
Дніпропетровськ К9	196	468	343	294	672	664	645	81
Київ К10	337	489	490	298	149	131	256	607
Харків К11	141	831	556	387	608	690	734	287



Умовні позначення:

К1, К2, К3, К4, К5, К6, К7, К8 – вантажоодержувачі (вершини графу);

К9, К10, К11 – вантажовідправники (вершини графу);

А11, А12, А13, А14, А15, А16, А17, А21, А22, А23, А24, А25, А26, А27, А31, А32, А33, А34, А35, А36, А37 – ділянки шляхів переміщення вантажопотоків.

Рис. 2. Схема можливих варіантів доставки вантажу

Однією з поширених практичних задач, що зводяться до оптимізації незалежних транспортних потоків, є пошук максимального транспортного потоку з пункту його зародження до пункту поглинання, наприклад визначення максимального потоку вантажів, що можуть бути перевезені з пункту відправлення до пункту призначення транспортною мережою з обмеженою пропускною спроможністю.

Таблиця 2

Матриця тарифів

	К1	К2	К3	К4	К5	К6	К7	К8	Запаси
К9	392	936	686	588	1344	1328	1290	162	1365
К10	674	978	980	596	298	262	512	1214	900
К11	282	1662	1112	774	1216	1380	1468	574	1700
Потреби	450	520	380	640	560	295	420	700	

Ця задача формулюється в такий спосіб. Задано транспортну мережу *G (V, E)*, в якій $n = |V|$ − кількість вершин, а $m = |E|$ − кількість дуг. Кожній дузі $(i,j) \in E$ відповідає невід'ємне число b_{ij}, назване її пропускною спроможністю й відповідною максимальною кількістю одиниць транспортного потоку, що може пройти дугою. Вершина *s* та *V*, з якої починається переміщення однорідного потоку, називається джерелом, а вершина $t \in V$, в якій воно закінчується, – стоком. Шляхом із *s* та *t* у *G (V, E)* називається така послідовність вершин і дуг, що $s \equiv i1;(i1, i2); i2; (i2i3),\ldots,(i_{n-1},i_n);i_n \equiv t$...

Однорідним транспортним потоком у мережі *G (V, E)* називається множина чисел x_{ij} таких, що

$$\sum_{(i,j)\in E} x_{ij} - \sum_{(j,i)\in E} x_{ji} = 0 \tag{1}$$

$j \neq s,\ 0 \le x_{ij} \le b_{ij}, (i, j) \in E$.

Кількість потоків, що виходять із джерела або входять до стоку, дорівнюватиме

$$\sum_{(s,i)\in E} x_{si} - \sum_{(i,s)\in E} x_{is} = \sum_{(i,t)\in E} x_{it} - \sum_{(t,i)\in E} x_{ti}. \tag{2}$$

Під задачею про максимальний потік розуміється задача пошуку в *G (V, E)* потоку максимального розміру *v*, що протікає із *s* у *t*.

Узагальнена задача про транспортний потік мінімальної вартості на мережі *G (V, E)* може бути сформульована як задача лінійного програмування такого вигляду:

$$\sum_{(i,j)\in E} c_{ij}x_{ij} = \min,$$

$$\sum_j x_{ij} - \sum_j k_{ji}x_{ji} = \begin{cases} v_s, i = s, \\ 0, i \neq s, t, \\ -v_t, i = t, \end{cases} \quad (3)$$

$$0 \le x_{ij} \le b_{ij}, (i, j) \in E.$$

Оскільки у нашому випадку запаси дорівнюють потребам, то умова балансу зберігається, а модель транспортної задачі вважається закритою. При цьому проводяться перевірки отриманих оптимальних планів за допомогою попередніх потенціалів (u_i, v_j) по заповнених клітинах таблиці, де $u_i + v_j = c_{ij}$, допускаючи, що $u_1 = 0$.

Використовуючи метод найменшої вартості [12], було побудовано перший опорний план (табл. 3).

Таблиця 3

Перший опорний план

	К1	К2	К3	К4	К5	К6	К7	К8	Запаси
К9	392	936	686 [25]	588 [640]	1344	1328	1290	162 [700]	1365
К10	674	978	980	596	298 [560]	262 [295]	512 [45]	1214	900
К11	282 [450]	1662 [520]	1112 [355]	774	1216	1380	1468 [375]	574	1700
Потреби	450	520	380	640	560	295	420	700	

Отриманий перший опорний план допустимий, оскільки всі вантажі вивезено зі складів і потреби всіх отримувачів задоволено. Значення цільової функції для цього плану:

$F(x)$ = 686×25 + 588×640 + 162×700 + 298×560 + 262×295 + 512×45 + 282×450 + +1662×520 + 1112×355 + 1468×375 = 2 710 480 у. о.

Перевірка оптимальності опорного плану виконувалась за такою схемою:

$u1 + v3 = 686$; $0 + v3 = 686$; $v3 = 686$
$u3 + v3 = 1112$; $686 + u3 = 1112$; $u3 = 426$
$u3 + v1 = 282$; $426 + v1 = 282$; $v1 = –144$
$u3 + v2 = 1662$; $426 + v2 = 1662$; $v2 = 1236$
$u3 + v7 = 1468$; $426 + v7 = 1468$; $v7 = 1042$
$u2 + v7 = 512$; $1042 + u2 = 512$; $u2 = –530$
$u2 + v5 = 298$; $–530 + v5 = 298$; $v5 = 828$
$u2 + v6 = 262$; $–530 + v6 = 262$; $v6 = 792$
$u1 + v4 = 588$; $0 + v4 = 588$; $v4 = 588$
$u1 + v8 = 162$; $0 + v8 = 162$; $v8 = 162$

Опорний план неоптимальний, тому потребує покращання. Після здійснення необхідних операцій він набуде такого вигляду (табл. 4).

Таблиця 4

Оптимальний опорний план

	*V*1= –130	*V*2=936	*V*3=686	*V*4=362	*V*5=804	*V*6=768	*V*7=1018	*V*8=162
*U*1=0	392	936 [520]	686 [380]	588	1344	1328	1290	162 [465]
*U*2= = –506	674	978	980	596	298 [185]	262 [295]	512 [420]	1214
*U*3= = 412	282 [450]	1662	1112	774 [640]	1216 [375]	1380	1468	574 [235]

Мінімальні витрати при цьому становитимуть:

$F(x)$ = 936×520 + 686×380 + 162×465 + 298×185 + 262×295 + 512×420 + 282×450 + + 774×640 + 1216×375 + 574×235 = 2 383 340 у. о.

У результаті схема оптимальної доставки вантажу між постачальниками та споживачами матиме такий вигляд (рис. 3).

Після аналізу отриманого оптимального плану зроблено висновок, що найефективнішими маршрутами будуть А12, А13, А18; А25, А26, А27; А31, А34, А35, А38. Використання такого плану перевезень дозволяє задовольнити потреби всіх споживачів та доставити всі необхідні обсяги вантажів.

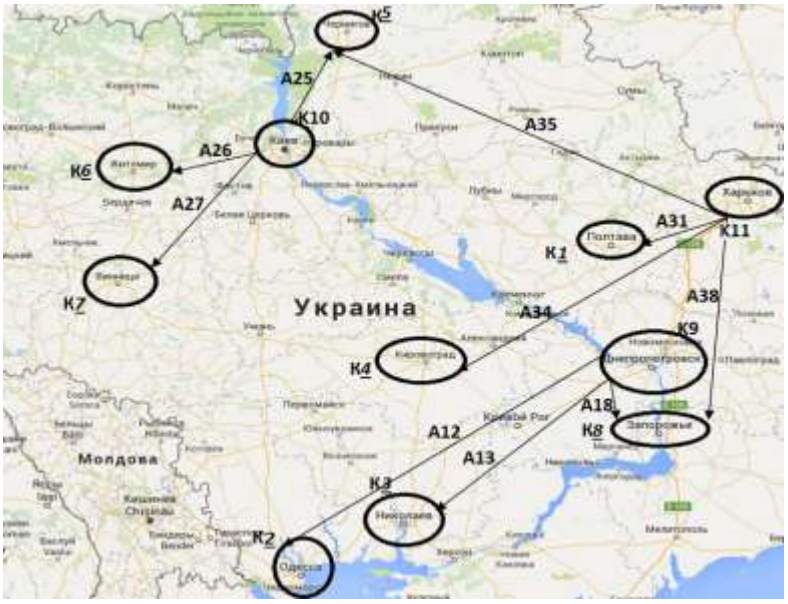


Рис. 3. Схема оптимальної доставки вантажів

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку. Запропонована схема транспортування вантажу між постачальниками та споживачами сприяє підвищенню ефективності функціонування транспортної системи в цілому. Зокрема, використання розробленої схеми дає можливість знизити витрати на перевезення на 13 % порівняно з наявною схемою організації переміщення вантажопотоків у транспортній мережі. Отже, такий підхід дозволяє оптимізувати маршрут перевезень та зменшити витрати на транспортування.

Подальший розвиток досліджень у даному напрямі може бути спрямований на формування раціональної транспортної системи не лише на національному, але й на глобальному чи, навпаки, локальному рівнях, що свідчить про гнучкість розробленої моделі й забезпечить ефективність і рентабельність перевезень.

Список використаних джерел:

1. Прокудін Г. С. Моделі та методи оптимізації вантажних перевезень в транспортних системах : дис. ... докт. тех. наук : спец. 05.22.01 / Георгій Семенович Прокудін. − К. : НТУ, 2012. – 44 с.

2. Манжула І. П. Оптимізація транспортних перевезень в умовах невизначеності [Електронний ресурс] / Манжула І. П. – Режим доступу : https://www.researchgate.net/publication/277097647_Optimizacia_transportnih_perevezen_v_umovah_neviznacenosti

3. Моисеенко Г. Е. Декомпозиционный метод решения задачи планирования объёмов перевозок / Моисеенко Г. Е. – М. : Наука, 1987. – 32 с.

4. Черкасский Б. В. Быстрый алгоритм построения максимального потока в сети / Б. В. Черкасский // Матем. методы решения экономических задач. – 1999. – Вип. № 7. – С. 117–126.

5. Диниц Е. А. Алгоритм решения задачи о максимальном потоке в сети : докл. АН СССР / Диниц Е. А. − М. : Машиностроение, 1988. – Т. 194. − № 4. – С. 46–57.

6. Позамантир Э. И. Учёт неравномерности перевозок грузов при планировании работы транспорта / Позамантир Э. И. – М. : Транспорт, 1994. – 250 с.

7. Соломатин Н. А. Имитационное моделирование в оперативном управлении производством / Н. А. Соломатин, Г. И. Беляев. – М. : Машиностроение, 1994. – 169 с.

8. Нагаев Б. В. Модель составления развозок грузов / Нагаев Б. В. – Ижевск : Удмуртия, 1994. – 320 с.

9. Кузьменко А. І. Удосконалення роботи вантажного фронту підприємства на основі аналізу та прогнозування обсягів виробництва готової продукції / А. І. Кузьменко, С. В. Мірошниченко, В. В. Жураховський // Вісник Академії митної служби України. Серія: “Технічні науки”. – 2014. – № 1 (51). – С. 116–123.

10. Мухачева Э. А. Транспортная задача на сети с дополнительными ограничениями / Э. А. Мухачева // Экономика и математические методы. – 1995. – 80 с.

11. Савин В. И. Оптимизация работы автотранспорта / Савин В. И. – М. : Транспорт, 1994. – 221 с.

12. Сервіс розв’язування транспортних задач [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://math.semestr.ru