ВЕСТНИК
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

УДК 621.396

В. В. Сахаров,
А. А. Чертков,
А. А. Дмитриев

АЛГОРИТМ ТРАФИКА ПЕРЕВОЗКИ ГРУЗОВ С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ МИНИМУМА ТРАНСПОРТНОЙ РАБОТЫ

В условиях экономических реформ существенно возрастает роль эффективного управления транспортными системами. Основной проблемой, возникающей при моделировании транспортных сетей, является разработка моделей, адекватных системам с применением методов дискретной комбинаторной оптимизации, которые должны быть гибкими в отношении выполняемых задач, быстро и с малыми затратами времени и ресурсов адаптироваться к постоянно изменяющимся условиям работы системы. С целью повышения эффективности и качества функционирования логистической системы, предлагается производить анализ и синтез сети со сложной топологией методами компьютерного моделирования с применением в качестве средства решения ориентированного графа, по которому определяется критический путь как наиболее эффективный для достижения заданного критерия качества. Для получения оптимальных решений предлагаются вычислительный алгоритм и процедура оптимизации, позволяющие сократить время, необходимое для перемещения грузопотока из исходного в конечный пункт, согласно критерию качества, за счет сокращения маршрутов следования потоков грузов по звеньям транспортной сети. Эффективность применения алгоритма демонстрируется на конкретном примере.

Ключевые слова: рекурсивный алгоритм, взвешенный граф, матрица сети, кратчайший путь, трафик, транспортная работа, оптимизация, критерий качества.

УПРАВЛЕНИЕ транспортными системами, совершенствование их трафика, поиск технических, технологических и организационных решений, способствующих обеспечению их функционирования на качественно новом уровне, связано с решением класса потоковых задач различной сложности [1] – [3]. Важным механизмом совершенствования трафика перевозки грузов с позиций системности является комплекс наиболее эффективных научно-обоснованных решений в данной предметной области, получаемых методами моделирования и алгоритмизации с применением инструментария вычислительных сред и компьютерных технологий соответствующего назначения для адаптации управления трафиком к изменяющимся условиям функционирования транспортной системы.

Одним из направлений поиска путей повышения эксплуатационных показателей и качества систем трафика перевозки грузов является эффективное использование моделей и методов исследования операций, а также арсенала математического инструментария, содержащегося в мощных вычислительных средах, для проведения компьютерного эксперимента, позволяющего без существенных материальных затрат эффективно управлять материальными и финансовыми потоками в автоматизированных транспортных сетях.

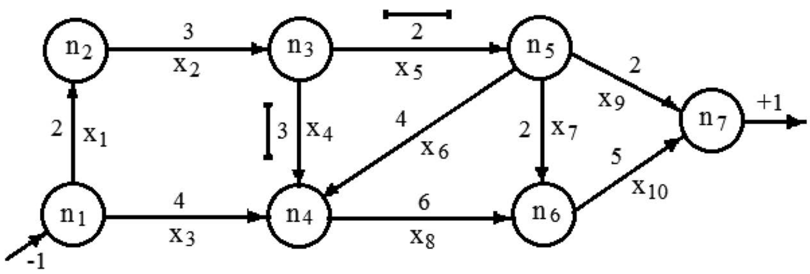
Отметим, что комплекс практических задач управления потоками в сетях различного назначения: транспортных, коммуникационных и связи, энергетических, логистических, гидравлических и др., может быть решен на основе общей теории систем, с использованием принципа наименьшего действия, моделей и методов дискретной комбинаторной оптимизации, адекватных реальным процессам. Актуальность решения задач данной проблематики подтверждается усилением требований к менеджменту качества и обоснованности принимаемых решений по организации и управлению производством с учетом динамики соответствующих секторов рынка [4] – [6].

В работе приводятся результаты исследований авторов, связанные с моделированием и алгоритмизацией трафика перевозки грузов по сети на заданном временном интервале и определением наиболее эффективных вариантов перевозок в условиях ограничений. Алгоритмом предусматривается двухэтапное решение. На первом этапе определяются наикратчайшие пути доставки грузов из пунктов отправления в пункты назначения. При введении ограничений схемы доставки грузов по сети генерируются на допустимом множестве комбинаций трафика. Ограничения задаются путем фиксации критерия в интервале от минимума до максимума. На втором этапе моделируется процесс доставки грузов с учетом имеющихся запасов в каждом пункте отправления (предложения на рынке) и требуемого количества грузов в пунктах назначения (спроса потребителей на рынке). Поиск наилучшего варианта доставки осуществляется по производственной матрице маршрутизации грузов методом линейного программирования. Алгоритмом реализации трафика предусматривается расчет объемов следования грузов по каждой ветви транспортной сети и введение требуемых ограничений с учетом пропускной способности элементов сети.

При транспортировке однородных грузов с одинаковыми удельными экономическими показателями модель предлагает выбор маршрутов доставки, соответствующих минимуму суммарной транспортной работы, традиционно измеряемой на водном транспорте как произведение объема перевозок на расстояние доставки. В иных случаях критерий качества будет соответствовать другому интегральному показателю в выбранных единицах измерения, необходимых для управления ресурсами.

Поскольку многие потоковые задачи являются многокритериальными, существенно усложняется поиск оптимальных решений, основанных, как правило, на принятии некоторых компромиссных оценок, которые, вообще говоря, могут не отвечать оптимуму ни по одному из критериев. Кроме того, часто приходится принимать во внимание нелинейный характер ряда эксплуатационных показателей сети и параметров ее модели, которые оцениваются методами параметрической и структурной идентификации по эксперименту. Модели, методы идентификации и оценки в сочетании с операциями фильтрации, выполняемыми с помощью фильтров Калмана — Бьюси, различных аналоговых и цифровых фильтров, вейвлет-преобразований и традиционных способов анализа сигналов, основанных на свойствах ортогональных рядов, являются рабочим механизмом гарантированного обеспечения адекватности модели и сети в реальных условиях функционирования.

Вычислительный алгоритм. Пусть некоторая транспортная сеть задана в виде взвешенного графа, приведенного на рисунке, где каждой дуге (ребру) соответствует определенное расстояние. Необходимо найти кратчайший путь для перевозки грузов из *i*-го узла транспортной сети в заданный *j*-й узел [7].



Расчетная схема транспортной сети

При построении модели и вычислительного алгоритма в сети с заданной топологией сначала выбираются узлы (порты отправления и назначения). Затем определяется целевая функция, вводятся ограничения в форме матричных уравнений — равенств и неравенств, устанавливаются требуемые нижняя и верхняя границы вектора переменных состояния, размерность которого равна числу дуг графа. Согласно процедуре вычислительного алгоритма, элементы вектора, соответствующие нижней границе, не должны принимать отрицательных значений. Для выполнения вычислительных операций на первом этапе в структуре алгоритма предусматривается обращение к функции линейного программирования bintprog инструментария Optimization Toolbox вычислительной среды MatLAB [8] – [10]. На втором этапе для решения задачи о назначениях используется функция linprog [11] – [12]. Подготовка данных и ввод информации осуществляются при соблюдении синтаксиса функций. Поиск минимума транспортной работы на маршрутах, содержащих дуги (ребра) с двумя направлениями, выполняется в цикле, представляющем все возможные варианты, определяемые с использованием булевых функций, из которых выбираются наиболее подходящие решения. В отличие от существующих алгоритмов, в предлагаемом алгоритме ограничения трафика назначаются заданием численных значений критерия качества, которые получаются на первом этапе для всех допустимых режимов работы сети. В исследовании операций к классу задач планирования трафика с выбором кратчайшего пути часто относят также задачи о замене оборудования, планировании выполнения работ, размещения предприятий и объектов инфраструктуры, планировании производства и др.

Известно, что наиболее распространенные и используемые на практике модели и алгоритмы решения задач о кратчайшем пути, такие как алгоритм Беллмана — Форда, алгоритм Дейкстры и др., строятся на основе пошаговых процедур динамической оптимизации [4] – [7], сложность которых возрастает в степени 2^n, где n — количество вершин в графе. Указанные обстоятельства, а также значительно возросшие технические возможности современных вычислительных сред, в том числе среды MatLAB, позволили авторам статьи получить оптимальные решения данной задачи с помощью инструментария целочисленного (бинарного) программирования. Для построения сетевой модели и алгоритма в работе используется математический аппарат дискретного программирования, в котором искомые переменные принимают только целочисленные или логические (булевы или бинарные) значения — нуль или единицу [10].

Построим без потери общности математическую модель и алгоритм применительно к транспортной сети (см. рисунок), представленной в виде взвешенного неориентированного графа. Граф состоит из семи узлов (вершин) и десяти дуг (ребер). Определим критический путь от узла № 1 к узлу № 7. Численные значения ребер (дуг) взвешенного графа приведены в табл. 1.

Таблица 1

Матрица весов ребер исходного графа

	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6	n_7
n_1	Исток	$x_1=2$		$x_3=4$			
n_2			$x_2=3$				
n_3				$x_4=3$	$x_5=2$		
n_4			$x_4=3$			$x_8=6$	
n_5			$x_5=2$	$x_6=4$		$x_7=2$	$x_9=2$
n_6				$x_8=6$			$x_{10}=5$
n_7							Сток

Заполним матрицу инциденций, используя следующее правило: каждый ее элемент S_{ij}, соответствующий n_i-й строке и n_j-му столбцу, равен:

$$S_{ij}=\begin{cases}0, \text{ если } x_j\text{-я дуга не инцидентна вершине } n_i;\\ -1, \text{ если } x_j\text{-я дуга инцидентна } n_i\text{-й вершине и исходит из нее};\\ +1, \text{ если } x_j\text{-я дуга инцидентна } n_i\text{-й вершине и входит в нее.}\end{cases}$$

Используя это правило, образуем матрицу инциденций и представим ее в форме, удобной для выполнения дальнейших расчетов. Полученная матрица для ориентированного графа (см. рисунок) имеет следующий вид:

S=

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
n_1	-1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
n_2	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
n_3	0	1	0	-1	-1	0	0	0	0	0
n_4	0	0	1	1	0	1	0	-1	0	0
n_5	0	0	0	0	1	-1	-1	0	-1	0
n_6	0	0	0	0	0	0	1	1	0	-1
n_7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1

Найдем кратчайшие пути от вершины x_1 до всех остальных вершин. С этой целью используем аппарат математического программирования для исследования линейной модели с вектором состояния x, содержащим бинарные переменные с индексами дуг:

$$x = [x_{12}\ \ x_{14}\ \ x_{23}\ \ x_{34}\ \ x_{35}\ \ x_{46}\ \ x_{54}\ \ x_{56}\ \ x_{57}\ \ x_{67}]^T$$

и целевой функцией

$$J = \min_x (\mathrm{f}x), \tag{1}$$

где f — вектор-строка с «весовыми» коэффициентами:

$$\mathrm{f} = [2\ \ 3\ \ 4\ \ 3\ \ 2\ \ 4\ \ 2\ \ 6\ \ 2\ \ 5].$$

Минимизацию (1) выполним при соблюдении линейных ограничений-равенств, представленных в матричной форме. Ограничения составим по уравнениям баланса потоков в каждом узле транспортной сети:

$$Sx = B,$$

или

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot x = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \tag{2}$$

где вектор B в модели (2) определяется из условий баланса потоков в соответствующих узлах графа. При следующих принятых обозначениях направлений потоков:

– для узла-источника — «Выход – Вход» = −1;
– для промежуточных узлов — «Выход – Вход» = 0;
– для узла-стока — «Выход – Вход» = +1;
– все неизвестные — неотрицательные переменные.

В общем случае, при различных направлениях трафика грузов по транспортной сети отдельные ребра графа могут иметь разные направления (как прямое, так и обратное). Такими ребрами, как следует из расчетной схемы (см. рисунок с. 181), являются ребра x_{34}, x_{35}. Эти пути помечены на рисунке линиями сверху. При составлении вычислительного алгоритма и реализации процедуры минимизации функции цели для них были выбраны четыре варианта ориентирования (табл. 2), определяемые двумя бинарными переменными.

Таблица 2

Варианты ориентирования ребер x_{34}, x_{35}

Номер варианта	Вершина n_3		Вершина n_4	Вершина n_5
	Ребро x_4	Ребро x_5	Ребро x_4	Ребро x_5
1	-1	-1	1	1
2	1	-1	-1	1
3	1	1	-1	-1
4	-1	1	1	-1

Требуется среди множества решений системы уравнений (2) найти такой неотрицательный результат, который составляет минимум целевой функции (1).

Реализация в среде MatLAB. Для решения задачи дискретного (целочисленного) программирования) вида

$$J = \min_{x}(f \cdot x)$$

в среде MatLAB (*License Attributes: version R2010b, license number:358625*) воспользуемся функцией

[x,J]=bintprog(f,A,b,Aeq,beq),

где f, b и beq — вектора; A и Aeq — матрицы; x — целочисленный вектор состояния, компоненты которого принимают значения 0 или 1; J — целевая функция (критерий качества).

Область поиска J путем вариации x ограничена следующими условиями [8]:

– A·x ≤ b — линейные ограничения типа неравенств;

– Aeq**x*=beq — линейные ограничения типа равенств.

Для обращения к функции bintprog подготовим входную информацию:

– вектор весовых коэффициентов целевой функции *f* (приведен ранее);

– матрица коэффициентов системы ограничений-равенств, составленная по уравнениям баланса (матрица инциденций):

Aeq=[-1 0 -1 0 0 0 0 0 0 0;1 -1 0 0 0 0 0 0 0 0;0 1 a(1)*(-1) a(2)*(-1) 0 0 0 0 0;0 0 1 a(1)*1 0 1 0 -1 0 0;0 0 0 0 a(2)*1;

-1 -1 0 -1 0; 0 0 0 0 0 0 1 1 0 -1;0 0 0 0 0 0 0 0 1 1],

где a(1), a(2) — элементы матрицы;

As=[1 1;-1 1;-1 -1;1 -1],

с помощью которой выбирается требуемый вариант ориентации ребер;

– вектор свободных (правых) членов системы уравнений (2) — ограничений-равенств, составленных по уравнениям баланса:

beq=[-100000001]',

где только одно значение -1(узел начала маршрута) и только одно значение +1 (узел завершения маршрута).

На первом этапе найдем минимум критерия качества с помощью функции bintprog, согласно ее синтаксису.

В отличие от известных алгоритмов, разработанный вычислительный алгоритм, реализованный в кодах MatLAB, позволяет получить наикратчайшие расстояния J_{ij} между любыми парами вершин n_i, n_j в диапазоне от J_{12} до J_{67}. Расчетные значения, полученные для выбранных направлений трафика перевозки грузов по сети (см. рисунок с. 181), приведены в табл. 3.

Таблица 3

Расчетные значения наикратчайших расстояний трафика перевозки грузов

Начало	Окончание	Наикратчайший путь	Расстояния
n_1	n_6	S=[x1 x2 x5 x7]=[1 1 0 0 1 0 1 0 0 0]	J_{16}=9
n_1	n_7	S=[x1 x2 x5 x9]=[1 1 0 0 1 0 0 0 1 0]	J_{17}=9
n_2	n_6	S=[x2 x5 x7]=[0 1 0 0 1 0 1 0 0 0]	J_{26}=7
n_2	n_7	S=[x2 x5 x9]=[0 1 0 0 1 0 0 0 1 0]	J_{16}=7
n_3	n_6	S=[x5 x7]=[0 0 0 0 1 0 1 0 0 0]	J_{36}=4
n_3	n_7	S=[x5 x9]=[0 0 0 0 1 0 0 0 1 0]	J_{37}=4
n_4	n_6	S=[x8]=[0 0 0 0 0 0 0 1 0 0]	J_{46}=6
n_4	n_7	S=[x4·x5 x9]=[0 0 0 1 1 0 0 0 1 0]	J_{47}=7

На втором этапе с помощью алгоритма решается задача распределения грузов, содержащихся в пунктах отправления (узлы n_1, n_3, n_4), по потребителям (пунктам назначения), расположенным в узлах n_6, и n_7. Решения основаны на данных, приведенных в табл. 3.

Рассматривается процесс полной доставки грузов в пункты назначения при отсутствии накопителей на пути их следования. Расчеты выполняются на основе производственной матрицы, приведенной в табл. 4, где в 1-й графе указаны узлы отправления грузов, во 2-й графе — узлы приема (назначения) грузов, а в 3-й графе — объемы поставок.

Таблица 4

Производственная матрица плана перевозок грузов по сети

Узлы отправления грузов	Узлы приема грузов		Объемы поставок, т
	n_6	n_7	
n_1	9	9	60
n_3	4	4	30
n_4	6	7	10
Объемы потребления	20	80	

Видно, что весовыми коэффициентами производственной матрицы являются данные, представляющие собой минимальные расстояния между соответствующими узлами отправления и приема грузов, приведенные в 4-й графе табл. 3.

Объемы поставок приведены в 4-й графе табл. 4, а объемы потребления — в последней строке этой таблицы. Полученные данные соответствуют условиям задачи трафика по сети с топологией, приведенной на рисунке.

Определение плана перевозок по оптимальным маршрутам транспортной сети выполним с помощью линейного программирования. Цель планирования состоит в минимизации транспортной работы по алгоритму трафика.

Введем вектор состояния y, элементами которого являются объемы перевозок между узлами отправления и приема грузов (см. табл. 4) с аналогичной индексацией:

$$y = [y_{16}\ \ y_{17}\ \ y_{36}\ \ y_{37}\ \ y_{46}\ \ y_{47}]^{T}.$$

Подготовим данные для использования функции linprog инструментария Optimization Toolbox. Согласно синтаксису функции, на основании производственной матрицы (см. табл. 4) получим

$$f1 = [9\ \ 9\ \ 4\ \ 4\ \ 6\ \ 7].$$

При отсутствии ограничений-неравенств численные значения $A1$, $b1$ приравняем к «пустым» матрицам. Ограничения-равенства представим выражениями:

$$\mathrm{A}1eq = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \qquad b1eq = \begin{bmatrix} 60 & 30 & 10 & 20 & 80 \end{bmatrix}^{T}.$$

Введем ограничения на переменные состояния: нижняя граница lb1 = [0 0 0 0 0 0]^T, верхняя граница ub1=[]. Тогда вычисления с использованием функции linprog приводят к следующему результату:

$$y_{opt} = [7.1551\quad 52.8449\quad 2.8449\quad 27.1551\quad 10.0000\quad 0.0000]^{T}.$$

Объем минимальной транспортной работы, при условии, что расстояния измеряются в километрах, а перевозимые грузы в — тоннах, составляет

$J1$=720 т·км.

Загрузку звеньев сети, соответствующую расчетному режиму, согласно алгоритму, представим в виде вектора:

$$x_{opt}= [x_{12}\ x_{14}\ x_{23}\ x_{34}\ x_{35}\ x_{46}\ x_{54}\ x_{56}\ x_{57}\ x_{67}]^{T}= [60\ \ 60\ \ 0\ \ 0\ \ 90\ \ 0\ \ 10\ \ 10\ \ 80\ \ 0]^{T}.$$

Анализ результатов. На основе разработанного алгоритма получены решения, сведенные в табл. 5.

Таблица 5

План перевозок по оптимальным маршрутам транспортной сети

Узлы отправления грузов	Узлы приема грузов		Объемы поставок
	n_6	n_7	
n_1	y_{16} = 7.1551	y_{17}=52.8449	60
n_3	y_{36} = 2.8449	y_{37}=27.1551	30
n_4	y_{46}=10.0000	y_{47}=0.0000	10
Объемы потребления	20	80	

Выводы

1. Разработан алгоритм трафика перевозки грузов в сетях с ограниченными ресурсами, основанный на экстремальных решениях, полученных методами исследования операций с использованием компьютерных вычислительных средств и способов количественной оценки принимаемых решений.

2. Предложена модель для выполнения технологических расчетов, представленная уравнениями функции цели и ограничениями в форме балансовых уравнений для каждого узла с учетом входных и выходных потоков в сетях при соответствующих ограничениях. Введены бинарные переменные состояния, что позволило фиксировать принадлежность каждой заданной операции (дуги) соответствующему критическому пути, используя для расчетов функции линейного программирования, содержащиеся в инструментарии Optimization Toolbox среды MatLAB.

3. Корректность и эффективность предложенных алгоритмических решений подтверждена конкретными примерами автоматизации оценки критического пути с полным анализом возможных вариантов, а также машинным экспериментом.

4. Приведенный алгоритм может быть использован не только для автоматизации и оптимизации логистических систем на водном транспорте, но и в телекоммуникационных системах пакетной передачи данных [14], в системах оптимизации маршрутных карт [13], а также в системах автоматизации и управления технологическими процессами высокой размерности различного назначения [15], [16].

5. Реализация управления трафиком по алгоритму, обеспечивающему минимум транспортной работы, предусматривает уменьшение потребления топлива на перевозки, что также определяет практическую ценность предлагаемых решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андрианов А. Г.* О некоторых подходах теории инвариантности к системам управления / А. Г. Андрианов, А. П. Курдюков. — М.: ИПУ РАН, 2015.—152 с.

2. Боженюк А. В. Подход к нахождению максимального потока в нечеткой транспортной сети / А. В. Боженюк, И. Н. Розенберг, Е. М. Рогушина // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2011. — № 5 (118). — С. 83–88.

3. *Гузаиров М. Б.* Моделирование транспортной сети поставок в строительной индустрии / М. Б. Гузаиров, В. А. Тарасова // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. — 2008. — Т. 10. — № 2. — С. 58–63.

4. *Оре О.* Теория графов / О. Оре. — М.: Изд-во: Либроком, 2009. — 354 с.

5. *Бояринцева Т. И.* Теория графов: методические указания к выполнению домашнего задания по курсу «Дискретная математика» / Т. И. Бояринцева, А. А. Мастихина. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. — 40 с.

6. *Рассел Д.* Диаграмма состояний (теория автоматов) / Д. Рассел. — Изд-во: VSD, 2012. — 96 с.

7. *Харари Ф.* Теория графов. — Изд. 2-е / Ф. Харари. — М.: Едиториал УРСС, 2003. — 296 с.

8. *Мироновский Л. А.* Введение в MATLAB: учеб. пособие / Л. А. Мироновский, К. Ю. Петрова. — СПб.: СПбГУАП, 2005. — 122 с.

9. *Сахаров В. В.* Алгоритм оптимального планирования группового взаимодействия роботов / В. В. Сахаров, А. А. Чертков, Д. С. Тормашев // Морской вестник. — 2014. — № 4. — С. 119–122.

10. *Зарипова Э. Р.* Дискретная математика: в 3 ч. — Ч. III. Теория графов / Э. Р. Зарипова, М. Г. Кокотчикова. — М.: Изд-во РУДН, 2013. — 179 с.

11. *D'Ambrosio C.* Mathematical programming techniques in water network optimization / C. D'Ambrosio, A. Lodi, S. Wiese, C. Bragalli // European Journal of Operational Research. — 2015. — Vol. 243. — Is. 3. — Pp. 774–788. DOI:10.1016/j.ejor.2014.12.039.

12. *Reich D.* A linear programming approach for linear programs with probabilistic constraints / D. Reich // European Journal of Operational Research. — 2013. — Vol. 230. — Is. 3. — Pp. 487–494. DOI:10.1016/j.ejor.2013.04.049.

13. *Bozhenyuk* A. The method of the maximum flow determination in the transportation network in fuzzy conditions / A. Bozhenyuk, I. Rozenberg, E. Rogushina // Proceedings of the Congress on Intelligent Systems and Information Technologies «IS&IT'11»: Scientific publications in 4 volumes. — M.: Physmathlit, 2011. — Vol. 4. — Pp. 17–24.

14. *Dutta D.* Multi-choice goal programming approaches for a fuzzy transportation problem / D. Dutta, A. S. Murthy // IJRRAS. — 2010. — Vol. 2 (2). — Pp. 132–139.

15. *Kumar A.* Generalized Simplex Algorithm to Solve Fuzzy Linear Programming Problems with Ranking of Generalized Fuzzy Numbers / A. Kumar, P. Singh, J. Kaur // TJFS: Turkish Journal of Fuzzy Systems. — 2010. — Vol. 1. — № 2. — Pp. 80–103.

16. *Kumar A.* Fuzzy Optimal Solution of Fully Fuzzy Linear Programming Problems with Inequality Constraints / A. Kumar, J. Kaur, P. Singh // International Journal of Applied Mathematics and Computer Sciences. — 2010. — Vol. 6. — Pp. 37–41.

ENSURING MINIMUM TRANSPORT WORK ALGORITHM FOR GOODS TRAFFIC

In economic reform context it has significantly increased the role of effective management of transport systems. The main problem in building effective models of transport networks is to develop adequate models and methods of discrete combinatorial optimization. They need to be more flexible with regard to tasks quickly and with a small investment of time and resources to adapt to the constantly changing demands on the system. With a view to enhancing the effectiveness and quality of the logistics system, we propose to produce analysis and synthesis of complex network topology using computer simulation methods as a means of solving a directed graph, determining critical path as the most effective for achieving the specified quality criteria. As a result of developed algorithm and optimization procedure to reduce the time required for the movement of traffic from the source to the destination, according to the criterion of quality. Example is considered to demonstrate the effectiveness of the algorithm.

Keywords: recursive algorithm, weighted graph, matrix network, shortest path, traffic, transport work, optimization, objective function.

REFERENCES

1. Andrianov, A. G., and A. P. Kurdjukov. *O nekotoryh podhodah teorii invariantnosti k sistemam upravlenija*. M.: IPU RAN, 2015.

2. Bozhenyuk, Alexander Vitalievich, Igor Naymovich Rozenberg, and Eugenia Michailovna Rogushina. "Approach of maximum flow determining for fuzzy transportation network." *Izvestiya SFedU. Engineering sciences* 5(118) (2011): 83–88.

3. Guzairov, M. B., and V. A. Tarasova. “Modelirovanie transportnoj seti postavok v stroitelnoj industrii.” *Vestnik UGATU* 10.2 (2008): 58–63.

4. Ore, O. *Teorija grafov*. Izdatelstvo: Librokom, 2009.

5. Bojarinceva, T. I., and A. A. Mastihina. *Teorija grafov: metodicheskie ukazanija k vypolneniju domashnego zadanija po kursu «Diskretnaja matematika»*. M.: MGTU im. N.Je. Baumana, 2014.

6. Russell, D. *Diagramma sostojanij (teorija avtomatov)*. Izd-vo: VSD, 2012.

7. Harari, F. *Teorija grafov. Izd. 2-e.* M.: Editorial URSS, 2003.

8. Mironovskij, L. A., and K. Ju. Petrova. *Vvedenie v MATLAB. Uchebnoe posobie*. SPb.: SPbGUAP, 2005

9. Saharov, V. V., A. A. Chertkov, and D. S. Tormashev. “The algorithm of the optimal planning for group interaction of robots.” *Morskoy Vestnik* 4 (2014): 119–122.

10. Zaripova, Je. R., and M. G. Kokotchikova. *Diskretnaja matematika. Chast III. Teorija grafov*. M.: Izd-vo RUDN, 2013.

11. D’Ambrosio, C., A. Lodi, S. Wiese, and C. Bragalli. “Mathematical programming techniques in water network optimization.” *European Journal of Operational Research* 243.3 (2015): 774–788. DOI:10.1016/j.ejor.2014.12.039.

12. Reich, Daniel. “A linear programming approach for linear programs with probabilistic constraints.” *European Journal of Operational Research* 230.3 (2013): 487–494. DOI:10.1016/j.ejor.2013.04.049.

13. Bozhenyuk, A., I. Rozenberg, and E. Rogushina. “The method of the maximum flow determination in the transportation network in fuzzy conditions.” *Proceedings of the Congress on Intelligent Systems and Information Technologies «IS&IT’11»: Scientific publications in 4 volumes*. Vol. 4. M.: Physmathlit, 2011: 17–24.

14. Dutta, D., and A. S. Murthy. “Multi-choice goal programming approaches for a fuzzy transportation problem.” *IJRRAS* 2(2) (2010): 132–139.

15. Kumar, A., P. Singh, and J. Kaur. “Generalized Simplex Algorithm to Solve Fuzzy Linear Programming Problems with Ranking of Generalized Fuzzy Numbers.” *TJFS: Turkish Journal of Fuzzy Systems* 1.2 (2010): 80–103.

16. Kumar, A., J. Kaur, and P. Singh. “Fuzzy Optimal Solution of Fully Fuzzy Linear Programming Problems with Inequality Constraints.” *International Journal of Applied Mathematics and Computer Sciences* 6 (2010): 37–41.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**
Сахаров Владимир Васильевич — доктор технических наук, профессор. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова» *saharov_@rambler.ru*	*Saharov Vladimir Vasilevich* — Dr. of Technical science, professor. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping *saharov_@rambler.ru*
Чертков Александр Александрович — кандидат технических наук, доцент. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова» *chertkov51@mail.ru*	*Chertkov Alexandr Alexandrovich* — PhD, associate professor. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping *chertkov51@mail.ru*
Дмитриев Александр Александрович — аспирант. Научный руководитель: *Сахаров Владимир Васильевич*. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова» *kaf _osnipr@gumrf.ru*	*Dmitriev Alexandr Alexandrovich* — postgraduate. Supervisor: *Saharov Vladimir Vasilevich*. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping *kaf _osnipr@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 8 ноября 2015 г.