

В.Г. Галушко

Статистический подход к планированию перевозок грузов на маршрутах транспортной сети региона

Предложены вероятностные законы распределения протяженности маршрутов и рейсов автомобильных перевозок на транспортной сети региона. Исследовано влияние суточного накопления грузов в пунктах сети на повышение эффективности планирования автомобильных перевозок.

The probability laws of distribution of the extents of routes and trips of automobile transportations on a region transport network are suggested. The influence of 24-hour accumulation of cargoes in items of a network on increasing the efficiency of the use of automobiles is investigated.

Запропоновано ймовірнісні закони розподілу відстаней маршрутів та рейсів автомобільних перевезень на транспортній мережі регіону. Досліджено вплив добового накопичення вантажів у пунктах мережі на підвищення ефективності планування автомобільних перевезень.

Введение. Среди различных видов перевозок автомобильным транспортом (городские, областные, междугородные, международные) особое место занимают перевозки на транспортных сетях автомобильных дорог с твердым покрытием. Транспортная сеть представляет собой совокупность всех путей сообщения, соединяющих населенные грузообразующие пункты государства или отдельного региона.

В технико-экономическом плане транспортная сеть – одна из главных составляющих народного хозяйства государства, обеспечивающая эффективное его функционирование и характеризующая уровень потенциала транспортного обеспечения страны.

При планировании и управлении перевозками грузов на транспортных сетях наибольшее распространение получили два вида моделей планирования:

- детерминированные модели на временной период (сутки, несколько суток) при заданном спросе на перевозки [1–3];

- составление постоянных графиков перевозок на длительный период (неделю, месяц, квартал, летний или зимний период) [4–9].

Этот вид моделей учитывает случайный характер формирования спроса на перевозки в пунктах транспортной сети и еще недостаточно исследован.

Цель данной статьи – определение законов распределения характеристик транспортной сети региона (области, Украины) и исследова-

ние влияния посуточного накопления объемов грузов в пунктах сети на повышение эффективности перевозок.

Особенности и основные характеристики транспортной сети

Среди основных характеристик транспортной сети автомобильных дорог, связанных с процессом перевозок [10, 11], следует указать:

- плотность сети автомобильных дорог в километрах на 1000 км²;
- длина маршрутов перевозок грузов в километрах;
- конфигурация транспортной сети;
- грузопотоки на сети дорог по направлениям.

Статистический анализ плотности в километрах автомобильных дорог для различных регионов показывает, что их средние значения различны.

Так, в России [10] длины автомобильных дорог с твердым покрытием в километрах на 1000 км² для трех федеральных округов – Центральный (17 областей), Южный (13 областей), Приволжский (14 областей) – подчиняется нормальному закону по областям со следующими параметрами: математическое ожидание $m = 210$ км, среднее квадратическое отклонение $\sigma = 59$ км.

Однако для Северо-Западного, Сибирского, Дальневосточного округов математическое ожидание на порядок меньше.

Математическая обработка длин автомобильных дорог с твердым покрытием общего пользования по областям Украины [11] на 1000 км² показывает, что распределение длин подчиняется нормальному закону с параметрами $m = 275$ км, а $\sigma = 55$.

Однако для Европы характерна более плотная густота дорог. Так, для Польши и Австрии среднее значение находится в пределах 1200–1400 км, а для Швейцарии, Франции, Германии оно равно 1700–1900 км.

Для автомобильных дорог Украины с твердым покрытием гистограмма и распределение длин маршрутов между 49 грузообразующими пунктами представлены на рис. 1.

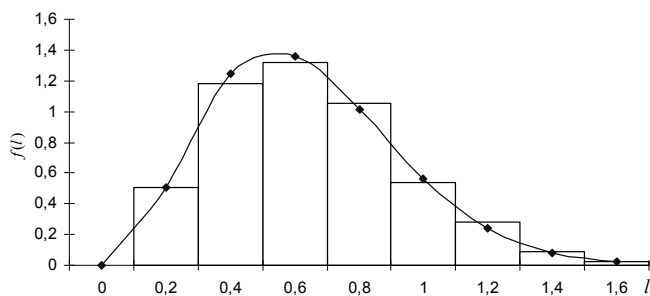


Рис. 1

Математическая обработка статистических данных с использованием различных законов распределения показала, что эти данные достаточно хорошо согласуются с законом Вейбулла (параметр формы $\alpha = 2,05$ и $\beta = 0,41$). Статистическая обработка длин маршрутов для автодорог Украины [8] показала хорошую согласованность с законом Релея, плотность которого задается следующей формулой

$$f(l) = \frac{(l-l_0)}{\sigma_r^2} e^{-\frac{(l-l_0)^2}{2\sigma_r^2}}, \quad l > l_0, \quad (1)$$

где l – протяженность маршрута, тыс. км; l_0 – минимальное значение длины маршрута, тыс. км; σ_r – параметр закона Релея.

Для данных рис. 1 $\sigma_r = 0,439$ (математическое ожидание $m = 0,55$, среднеквадратичное отклонение $\sigma = 0,3$).

Отметим, что для маятниковых маршрутов длина рейса равна $2l$.

Так, статистическая обработка длин рейсов при перевозке грузов большегрузными поездами по постоянным графикам для летнего периода (рис. 2, пунктирная линия) показала, что они подчиняются закону Релея с параметром $\sigma_r = 0,98$ и $l_0 = 0,25$ (математическое ожидание равно 1,476 тыс. км).

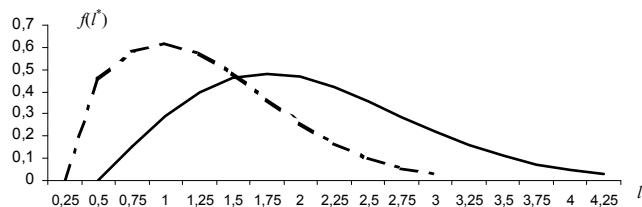


Рис. 2

Результаты расчета длин всевозможных трехзвенных междугородных маршрутов между 49 грузообразующими пунктами Украины и их статистическая обработка показала, что они подчиняются закону Релея с параметрами $\sigma_r = 1,257$, $l_0 = 0,5$ и математическим ожиданием в 2,075 тыс. км (рис. 2, сплошная кривая).

К показателям конфигурации сети можно отнести параметр k , характеризующий количество ближайших соседних пунктов к заданному грузообразующему пункту i по различным направлениям перевозок грузов. Например, для пункта 1 (рис. 3) $k = 3$, а для $i = 3$ $k = 5$. Так, статистическая обработка, выполненная для 39 грузовых автостанций междугородных маршрутов Украины, показала, что распределение количества ближайших соседних пунктов подчиняется сдвинутому [12] на единицу ($k = 1, 2, \dots, 7$) закону Пуассона с математическим ожиданием, равным четырем.

Следует отметить, что принятие обоснованных решений при планировании и организации перевозок грузов на транспортной сети региона требует учета случайного характера формирования грузопотоков в грузообразующих пунктах и их описания вероятностными законами распределения непрерывной случайной величины объемов (в тоннах) или дискретной (количество отправок автомобилей) [6–8].

Введем следующие обозначения:

l_{ij} – расстояние между пунктами, тыс.км,
 i, j – номера грузообразующих пунктов, $i, j = 1, 2, \dots, n$;

(i, j) – маятниковый маршрут перевозок грузов для многозвенного маршрута $(i, \dots, i_r, \dots, j)$;

t – временной период, кратный суткам, $t = 1, 2, \dots$;

Q_{ij}, Q_{ji} – независимые случайные объемы отправок грузов (непрерывных или дискретных) из соответствующих пунктов, с $f_{ij}(q), f_{ij}(k)$ – плотностями распределения объемов грузов в тоннах или распределения дискретных значений количества отправок автомобилей заданной грузоподъемности, а для всей транспортной сети эти распределения являются элементами квадратной матрицы размерности n ;

a_{ij}, a_{ji} – математические ожидания распределения случайных величин ежесуточного количества формируемых грузов;

$m_{ij} = m_{ji}$ – математическое ожидание суточного количества отправок с загрузкой автомобиля в прямом и обратном направлениях;

N_i – математическое ожидание суммарного суточного количества автомобилей, отправляемых из i -го пункта в различных направлениях. При необходимости могут быть заданы минимальное и максимальное значения;

β_{ij} – коэффициент использования пробега автомобиля – отношение длины пробега автомобиля с грузом к общему пробегу на маршруте;

p_{ij} – вероятность выполнения перевозок с загрузкой автомобиля в прямом и обратном направлениях.

Вероятностная оценка различных планов перевозок на маршруте

Рассмотрим организацию перевозок на отдельно выбранном маятниковом маршруте длины l транспортной сети, т.е. между двумя (i, j) грузообразующими пунктами (терминалы, грузовые автостанции и др.). В каждый пункт ежесуточно поступает поток требований на перевозку грузов (для определенности будем рассматривать отправки загруженных контейнеров или поездные отправки автомобилями с одинаковой грузоподъемностью). Эти грузы перевозятся автомобилем в пункт назначения в

прямом направлении (i, j) , выгружаются, затем автомобиль загружается другим грузом (если он имеется) и перевозит его в обратном направлении (j, i) , т.е. автомобиль выполняет рейс с общим пробегом $2l$. Предполагается, что ежесуточное формирование грузов – случайная величина (в общем случае непрерывная или дискретная), а количество автомобилей для перевозок достаточно.

Эффективное использование автомобилей зависит от наличия грузов для перевозки в обратном направлении, что возможно обеспечить посуточным накоплением грузов в пунктах.

Таким образом, представляет научный и практический интерес установление закономерностей формирования грузов в пунктах и рациональное использование автомобилей путем уменьшения порожних пробегов.

Отметим, что для планирования автомобильных перевозок [8, 9] исследован и впервые предложен принципиально новый подход к определению объемов грузов, которые могут быть перевезены с загрузкой автомобиля в обоих направлениях, как случайной величины Q_3 из минимума двух случайных величин объемов грузов Q_{ij}, Q_{ji} , ежесуточно формируемых на маятниковом маршруте (i, j) .

$$Q_3 = \min [Q_{ij}, Q_{ji}]. \quad (2)$$

Для законов Пуассона с параметрами a_{ij}, a_{ji} математическое ожидание равно

$$m_{ij} = m_{ji} = e^{-a_{ij}-a_{ji}} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=n+1}^{\infty} \frac{a_{ij}^k}{k!} \sum_{s=n+1}^{\infty} \frac{a_{ji}^s}{s!}. \quad (3)$$

При планировании вывоза из пунктов всех имеющихся объемов грузов без накопления, согласно предлагаемому подходу следует рассматривать случайную величину $Q_M = \max [Q_{ij}, Q_{ji}]$ и в сравнении с (2) эффективность использования транспорта снижается при увеличении порожних пробегов автомобиля.

Показателем оценки плана перевозок примем коэффициент использования пробега автомобиля как отношение суммарного пробега с грузом при выполнении всех ездов к общему пробегу, включая и порожний.

Рассмотрим транспортную ситуацию, когда ежедневные отправки автомобилей в 6 пунктов транспортной сети (рис. 3) формируются по закону Пуассона с параметрами a_{ij} , a_{ji} , а количество маршрутов равно 15 (табл. 1).

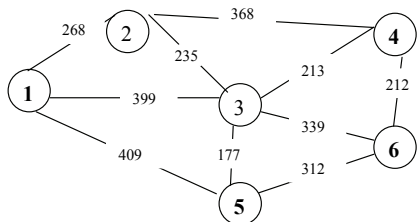


Рис. 3. Фрагмент транспортной сети с указанием расстояний между грузообразующими пунктами (1–6) в километрах

Таблица 1. Результаты расчета математического ожидания $m_{ij} = m_{ji}$ на 15 маятниковых маршрутах (рис. 3) при ежедневном формировании грузов по закону Пуассона с параметрами a_{ij} , a_{ji} , а также при накоплении грузов за двое–трое суток.

Маршруты <i>N: (i,j); L_{ij}, км</i>	1 сутки			2 суток			3 суток		
	a_{ij}	a_{ji}	m_{ij}	a_{ij}	a_{ji}	m_{ij}	a_{ij}	a_{ji}	m_{ij}
1. (1,2); 268	2,25	2,25	1,45	4,5	4,5	3,5	6,75	6,75	5,2
2. (1,3); 399	0,5	0,5	0,17	1	1	0,47	1,5	1,5	0,84
3. (1,5); 409	0,25	1,75	0,2	0,5	3,5	0,47	0,75	5,25	0,73
4. (2,3); 235	2,5	2,5	1,7	5	5	3,7	7,5	7,5	5,9
5. (2,4); 368	0,25	2,25	0,22	0,5	4,5	0,48	0,75	6,75	0,68
6. (3,4); 313	1	2,25	0,77	2	4,5	1,78	3	6,75	2,6
7. (3,5); 177	1	0,25	0,15	2	0,5	0,39	3	0,75	0,67
8. (3,6); 339	1,25	0,5	0,32	2,5	1	0,8	3,75	1,5	1,32
9. (4,6); 212	0,5	2,25	0,42	1	4,5	0,95	1,5	6,75	1,35
10. (5,6); 312	3,5	2,5	1,87	7	5	4,0	10,5	7,5	6,9
11. (1,2,4); 636	0,5	1	0,27	1	2	0,73	1,5	3	1,2
12. (1,5,6); 721	1,25	1,5	0,75	2,5	3	1,8	3,75	4,5	3,12
13. (2,3,5); 412	2,5	1,5	1,25	5	3	2,6	7,5	4,5	3,72
14. (2,3,6); 574	4,25	2,75	2,29	8,5	5,5	5,2	12,7	8,25	7
15. (4,3,5); 490	0,5	0,75	0,22	1	1,5	0,62	1,5	2,25	1,07
Сумма	22	24,5	12,0	44	49	27,5	66	73,5	42,3

Используя данные табл. 1, можно рассчитать коэффициенты использования пробега (отношение пробега автомобиля с грузом к его общему пробегу) по следующей формуле [7, 9]:

$$\beta_{ij} = (a_{ij} + a_{ji}) / 2(a_{ij} + a_{ji} - m_{ij}), \quad (4)$$

где a_{ij} , a_{ji} – математические ожидания формируемых отправок; m_{ij} – математические ожидания отправок с загрузкой в обоих направлениях.

Рассчитанные для закона Пуассона математические ожидания $m_{ij} = m_{ji}$ при $a_{ij} = 1$ и различных значениях a_{ji} представлены в табл. 2, рис. 4.

Таблица 2

a_{ji}	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
$m_{ij} = m_{ji}$	0	0,27	0,47	0,62	0,73	0,8	0,845	0,89	0,92	0,97

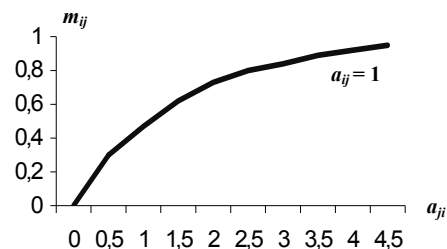


Рис. 4

В табл. 3 представлены распределения вероятностей количества отправок автомобилей на маятниковых маршрутах при различных значениях математических ожиданий a_{ij} и a_{ji} .

Пусть на маршруте в начальном и конечном пунктах ежедневно формируется по одной отправка. Рассмотрим три варианта перевозок.

1. Для детерминированного варианта коэффициент пробега $\beta_d = 1$.

2. При распределении отправок по закону Пуассона ($a_{ij} = a_{ji} = 1$, $m_{ij} = 0,47$, табл. 3 строка 1) и расчете по формуле (4) $\beta_{ij} = 2/2(2 - 0,47) = 0,65$, т.е. в сравнении с детерминированным уменьшается на 35%.

3. При накоплении грузов в течение трех суток ($a_{ij} = a_{ji} = 3$ строка 3 табл. 3) с вероятностью 0,904 перевозки могут выполняться с загрузкой автомобиля в прямом и обратном направлениях.

По результатам расчета в *Math.cad* распределений и математических ожиданий количества отправок автомобилей в прямом и обратном направлениях построены графики зависимостей m_{ij} от a_{ji} и a_{ij} . На рис. 4 при $a_{ij} = 1$, а на рис. 5 для кривых 1; 2; 3; 4 a_{ij} соответственно равны 3; 5; 7; $a_{ij} = a_{ji}$.

Полученные зависимости с достаточной для вычислений точностью могут быть аппроксимированы уравнением логистической кривой вида

$$y = \frac{b}{c + e^{-dx}}, \quad (5)$$

где b , c , d – постоянные коэффициенты.

Т а б л и ц а 3. Результаты расчета в *Math/cad* распределений отправок автомобилей

Параметры				Распределения вероятности количества отправок автомобилей, равных 0; 1; 2; ... 12											
№	a_{ii}	a_{ij}	m_{ij}	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	1	0,47	0,6	0,33	0,06	0,006								
2	2	2	1,2	0,25	0,39	0,248	0,084	0,017	0,002						
3	3	3	2,0	0,096	0,258	0,3	0,2	0,07	0,035	0,005					
4	4	4	2,9	0,036	0,138	0,244	0,259	0,182	0,091	0,034	0,009	0,002			
5	5	5	3,6	0,013	0,065	0,153	0,223	0,224	0,162	0,088	0,037	0,012			
6	6	6	4,6	0,005	0,029	0,086	0,159	0,209	0,204	0,152	0,089	0,042			
7	7,5	7,5	6	0,001	0,008	0,031	0,075	0,132	0,178	0,178	0,188	0,16	0,11	0,06	0,03
8	9	9	6,9	0	0,002	0,01	0,029	0,063	0,108	0,149	0,167	0,155	0,12	0,08	0,05
9	1	2	0,73	0,45	0,39	0,13	0,023	0,003							
10	2	4	1,76	0,151	0,308	0,292	0,165	0,061	0,016	0,008					
11	3	6	2,7	0,05	0,158	0,241	0,237	0,164	0,084	0,032	0,01	0,002			

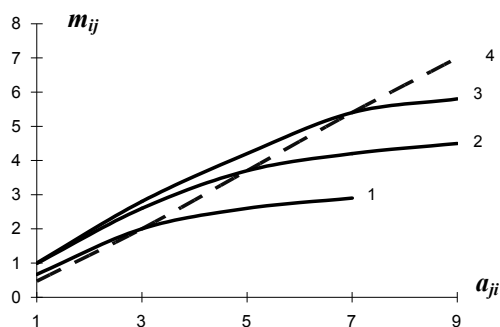


Рис. 5

Отметим, что количество суточных отправок из заданного i -го грузообразующего пункта может быть определено как случайная величина Q_i , представляющая собой сумму случайного числа случайных отправок Q_{ik}

$$Q_i = \sum_{k=0}^K Q_{ik} \quad (6)$$

В случае когда количество отправок не должно превышать заданного наличия автомобилей n , случайная величина Q_i определяется так:

$$Q_i = \sum_{k=0}^{\min(K, n)} Q_{ik} \quad (7)$$

Посуточное накопление грузов в пунктах сети увеличивает время простоя, но позволяет существенно повысить эффективность процесса перевозок (увеличение суточных объемов перевозок, коэффициента использования пробега и др.). Так, согласно статистическим данным большегрузные автопоезда за сутки на междугородных маятниковых маршрутах могут пе-

ревозить груз в прямом направлении на расстояние до 700 км, за двое суток – до 1200 км, за трое суток – до 1650 км. Таким образом, для некоторых маршрутов можно планировать перевозку в обратном направлении, когда на момент оперативного планирования грузы отсутствуют, но с определенной вероятностью в последующие дни вследствие накопления грузов может быть обеспечена отправка автомобиля с грузом в обратном направлении,

что позволяет планировать значительно большее количество ездов. Для транспортной сети из 39 пунктов из общего количества маятниковых маршрутов ($39 \times 38 / 1 \times 2 = 741$) на расстояние больше 700, 1200 и 1650 км (рис. 2) их соответственно будет 54, 16 и 4% (до 700 км 46%). Очевидно, что трехзвенных маршрутов (из общего числа 9137) возможно планировать значительно большее количество рейсов по сравнению с двухзвенными.

Отметим, что накопленный опыт внедрения централизованного ежесуточного планирования на междугородных перевозках 16 тыс. контейнеров между 39 грузовыми автостанциями Украины, базирующийся на использовании теории графов [1, 2, 4, 9] полностью подтверждает эти выводы. Программное обеспечение включало два этапа. На первом этапе по транспортной ситуации на начало суток формировались всевозможные маршруты их доставки, а на втором – рассчитывались оптимальные графики перевозок (решалась задача о наименьшем покрытии). Общее количество запланированных рейсов в сутки составляло 170–200, а с учетом накопления грузов для отправки в обратном направлении их количество увеличивалось на 3–7%.

Заключение. Установленные законы распределения протяженностей маршрутов и количества направлений движения из грузообразующих пунктов междугородной транспортной сети дорог Украины позволяют разрабатывать вероятностные модели для оценки пла-

нов отправки грузов на маршрутах с учетом посуточных законов формирования и накопления грузов.

В перспективе целесообразно сосредоточить исследования транспортного процесса перевозок грузов на сетях и на решении следующих задач:

- разработка концепции перевозок на транспортных сетях с использованием новых информационных и телекоммуникационных технологий;
- исследование экономически целесообразных посуточных сроков накопления грузов в пунктах сети с целью создания терминалов и оптимизации перевозок по заданному критерию;
- разработка методологии расчета тарифов на перевозки грузов из условия обеспечения заданной рентабельности и особенно увеличения объемов международных транзитных перевозок через территорию Украины.

1. *Кристофидес Н.* Теория графов. Алгоритмический подход. – М.: Мир, 1978. – 432 с.
2. *Задачи оптимального проектирования надійних мереж / Н.З. Шор, І.В. Сергієнко, В.П. Шило та ін.* – К.: Наук. думка, 2005. – 230 с.
3. *Wynant С.* Network Synthesis Problems, – Boston; Dordrecht; London: Kluwer Acad. Publ., 2000.

4. *Галушко В.Г.* Оптимізація автоперевезень в термінальних системах // Вчені записки. – 2003. – № 5. – С. 136–141.
5. *Галушко В.Г.* Две модели оптимизации перевозок по маятниковому маршруту // Доп. НАН України. – 2000. – № 11. – С. 123–125.
6. *Шевченко А.И., Шульга Ю.Н., Шульга Е.Ю.* Исследование марковской ненадежной объемной сети // Кибернетика и системный анализ. – 1998. – № 8. – С. 68–77.
7. *Галушко В.Г.* Некоторые стохастические модели оптимизации планирования грузовых перевозок на маршрутах транспортной сети // УСиМ. – 2004. – № 2. – С. 85–89.
8. *Галушко В.Г.* Основные направления планирования автомобильных перевозок грузов на транспортных сетях региона // Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту і експлуатації автомобіля. – 1999. – 8. – С. 142–146.
9. *Галушко В.Г.* Вибір стратегій планування вантажних перевезень // Зб. наук. пр. «Проблеми автомобільного транспорту». – 2000. – № 1. – С. 58–59.
10. *Российский статистический ежегодник.* – М.: 2002. – 690 с.
11. *Статистичний щорічник України.* – 2006. – 662 с.
12. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Высш. шк., «000». – 480 с.

Поступила 17.03.2009
Тел. для справок: (044) 502-6342 (Киев)
© В.Г. Галушко, 2009

●

Внимание !

**Оформление подписки для желающих
опубликовать статьи в нашем журнале обязательно.**

В розничную продажу журнал не поступает.

Подписной индекс 71008