

## Обеспечение надёжности предоставления услуг по техническому обслуживанию рассредоточенных объектов

*Н.М. Нечитайло*

*Российский университет транспорта, Москва*

**Аннотация:** Рассматривается задача планирования обоснованных гарантированных запасов топлива различных типов для обеспечения технического обслуживания группы рассредоточенных объектов силами выездных органов обслуживания. Рассмотрены факторы, влияющие на эффективность решения. Предложено применить «соревнование» двух методов решения: на основе статистических данных о погоде за рассматриваемый период и на основе метода теории игр, рассматривающего природу как злонамеренного противника. Предложена методика анализа полученных результатов.

**Ключевые слова:** теория игр, симплекс-метод, статистическая обработка результатов, целевая функция.

Рассматривается задача планирования обоснованных гарантированных запасов топлива различных типов на исследуемый временной период (месяц, полугодие, год), при которых достигается минимальное время объезда группы рассредоточенных объектов для обеспечения надёжности технического обслуживания этих объектов силами выездных органов обслуживания.

Таким образом, целевая функция (надёжность обеспеченности имеющихся типов транспортных средств топливом) имеет вид:

$$F(Q_i) = \begin{cases} p(q_i \leq Q_i) (i - 1..m) \rightarrow \max, \\ \text{при } \sum_{i=1}^m c_i Q_i \rightarrow \min, \end{cases} \quad (1)$$

где  $q_i$  - необходимые запасы топлива  $i$ -го типа;

$Q_i$  - создаваемые запасы топлива  $i$ -го типа;

$c_i$  - стоимость единицы топлива  $i$ -го типа;

$m$  - количество типов транспортных средств.

В свою очередь создаваемые запасы топлива  $i$ -го типа определяются выражением:

$$Q_i = DIR \cdot p_i \cdot \frac{S}{r_i} = DIR \cdot p_i \cdot \frac{V_i \cdot t_{ij}}{r_i}, \quad (2)$$

где  $DIR$  – установленное количество поездок в рассматриваемый период;

$p_i$  - частота использования  $i$  – го типа транспортного средства;

$S$  - длина маршрута (км.);

$r_i$  - норма расхода топлива  $i$ -го типа транспортного средства (л/100 км.);

$V_i$  - нормативная скорость движения  $i$ -го транспортного средства;

$t_{ij}$  - время движения  $i$ -го транспортного средства по маршруту при  $j$ -м состоянии условий движения (результат статистических испытаний).

Разумеется, в случае одновременного использования транспортных средств одного типа (движение выездных органов обслуживания в составе колонны) норма расхода топлива  $i$ -го типа транспортного средства ( $r_i$ ) должна быть увеличена в такое же количество раз.

Иными словами необходимо определить такие значения  $Q_i$  ( $i=1..m$ ), при которых выполняется условие  $P(q_i \leq Q_i) \geq P_z$ , где  $P_z$  - заданная надёжность обеспеченности топливом выездных органов обслуживания на рассматриваемый промежуток времени.

Из вида целевой функции следует вывод – при достижении минимально возможного времени совершения указанного директивно количества объездов назначенных маршрутов достигается минимально возможная стоимость топливных запасов, необходимых для выполнения этой задачи. Следовательно, найденный гарантированный запас топлива обеспечивает заданную надёжность выполнения главной задачи – своевременную доставку выездных органов обслуживания на группу рассредоточенных объектов.

Сформулированная задача имеет много общего с классическими задачами управления запасами [1-3]. В таких задачах, кроме стоимости единицы основного ресурса определяющими параметрами являются, как правило, периодичность поставок, стоимость доставки и хранения единицы ресурса, потери от неудовлетворённого спроса, время заказа и прочее. Виду особенностей сформулированной задачи (максимизация надёжности обеспечения ресурсами выездных органов обслуживания для совершения заранее заданного количества объездов назначенных рассредоточенных

объектов при минимизации стоимости периодически создаваемых запасов ресурсов) предлагается в качестве основного метода использовать аппарат теории игр [4-6]. В то же время, в случаях резкого изменения обстановки (усиления/ослабления ранее учитываемых факторов или появления новых) указанные методы могут быть использованы для оперативного пополнения запасов топлива.

Однако, необходимо отметить, что при усилении/ославлении ранее учитываемых факторов или появлении новых предлагаемый ниже метод расчёта необходимых запасов топлива (пополнения имеющихся запасов) вполне применим, поскольку алгоритм решения, реализованный в предлагаемом методе, имеет вычислительную сложность не выше полиномиальной, а следовательно пригоден не только для задач долгосрочного планирования, но и для задач оперативного управления.

Факторы, определяющие эффективность решения:

- состояние транспортных коммуникаций между объектами обслуживания и местом постоянной дислокации обслуживающих органов;
- погодные условия на планируемых маршрутах движения;
- тип используемых транспортных средств;
- время на доставку органов обслуживания к местам выполнения работ;
- время на техническое обслуживание объектов;
- установленные нормативы расхода топлива для имеющихся типов транспортных средств;
- стоимость топлива различных типов для доставки имеющимися транспортными средствами подразделений обслуживания к местам выполнения работ.

Определяющее влияние на требуемые запасы топлива оказывает периодичность объездов рассредоточенных объектов, устанавливаемая

директивно (в соответствии с действующей эксплуатационно-технической документацией, другими руководящими документами).

Существенное влияние на расход топлива может оказать и характер планируемых работ: выполнение обслуживания на объектах в соответствии с утверждённым сетевым графиком, либо простой объезд (патрулирование) назначенных объектов для контроля их технического состояния. В первом случае для оптимизации расходов широко применяются методы теории расписаний [4-7], во втором – методы исследования операций [2, 4, 8-12], например, задача коммивояжера для минимизации общей длины планируемых маршрутов.

Во всех указанных случаях существенное влияние на эффективность принимаемых решений оказывает состояние маршрутов, в том числе и погоды, на конкретном участке местности. Задача учёта этого фактора осложняется его неопределённым характером. В этой связи разработано множество методов, позволяющих минимизировать риски, связанные с неопределённым состоянием погоды [2, 4]. При этом большинство из них либо базируются на учёте мнений экспертов, либо содержат в выражениях функций рисков (выигрышей) коэффициенты, определяемые эмпирически. Исходя из изложенного, предлагается использовать несколько методов с последующим анализом полученных результатов для принятия обоснованного решения.

В качестве первого метода предлагается использовать статистические данные о погодных условиях в рассматриваемом районе (местности). Исходя из анализа этих данных, определить дни применения тех или иных типов транспортных средств и рассчитать необходимое количество топлива на рассматриваемый временной период с учётом установленного количества объездов рассредоточенных объектов и с учётом нормативов расхода топлива на имеющиеся типы транспортных средств по формуле (2). Определение дней использования того или иного типа транспорта может быть выполнено по

достаточно простым правилам (автомобиль используется в сухую погоду, гусеничный транспорт – при серьёзном ухудшении дорожной обстановки, вертолёт – в дневное время при ясной погоде и т.д.).

Исходные и выходные данные для сформулированной задачи представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Исходные и выходные данные

Исходные данные	
Для методов с учётом погодной статистики	Для методов теории игр (с учётом других возможных факторов на маршрутах)
Ежегодная статистика по погодным условиям	Временные затраты (платёжная матрица) используемых транспортных средств при различных условиях на маршруте
<ul style="list-style-type: none"><li>• Директивное количество контрольных поездок на установленный временной промежуток (квартал, полугодие, год)</li><li>• Норма расхода топлива для имеющихся типов транспортных средств</li></ul>	
Выходные данные	
<ul style="list-style-type: none"><li>• Оптимальная частота использования имеющихся типов транспортных средств</li><li>• Необходимый запас топлива каждого типа</li></ul>	

В общем виде платёжная матрица представлена в табл. 2, где под внешними факторами могут пониматься не только погодные условия (ясно, осадки, туман, гололёд и т.д.), но и постоянные либо эпизодические дорожные факторы (наличие подтапливаемых участков, дорожные работы, водные переправы, в том числе и зимние по льду, участки, проходящие через населённые пункты и т.д.). Могут быть учтены и особенности доставки обслуживающих органов к местам проведения работ, например, движение в составе колонны, применение многоосной техники, прицепов и прочее.

Таблица 2 – Платёжная матрица

	Типы транспортных средств					
Внешние факторы	Тип тр. 1	Тип тр. 2	...	Тип тр. i	...	Тип тр. m
Фактор 1	$t_{11}$	$t_{21}$	...	$t_{i1}$	...	$t_{m1}$
Фактор 2	$t_{12}$	$t_{22}$	...	$t_{i2}$	...	$t_{m2}$
...	...	...	...	...	...	...
Фактор j	$t_{1j}$	$t_{2j}$	...	$t_{ij}$	...	$t_{mj}$
...	...	...	...	...	...	...
Фактор n	$t_{1n}$	$t_{2n}$	...	$t_{in}$	...	$t_{mn}$

Необходимо также отметить, что рассматриваемый подход позволяет учесть **взаимное влияние внешних факторов** на итоговое время движения по маршруту. Так, по фактором  $j$  может быть учтено взаимное влияние типовых (стандартных) внешних факторов (например,  $j-2$  и  $j-1$ ) друг на друга (например, осадки, сильный ветер и сезонные характеристики маршрута, например, наличие либо паромной переправы на участке, либо устройство зимней переправы по льду водоёма).

Представленная платёжная матрица содержит временные издержки  $t_{ij}$  использования  $i$ -го типа транспортного средства ( $i=1..m$ ) при действии  $j$ -го ( $j=1..n$ ) внешнего фактора.

Задача заключается в определении оптимальной частоты использования имеющихся типов транспортных средств, при которой временные затраты на движение по установленным маршрутам минимальны (а следовательно, минимальны и необходимые запасы топлива для доставки органов обслуживания на объекты).



Таким образом, нужно найти  $x_i$ , при которых соблюдаются ограничения (6) и при которых функция (8) достигает максимума.

Далее следует решить сформулированную задачу в соответствии с симплекс-методом решения основной задачи линейного программирования [1, 6-9]. Затем из полученных  $x_i$  и  $v(p_i)$  в соответствии с (5) следует рассчитать  $p_i$ .

Получив вероятности  $p_i$  использования имеющихся типов транспортных средств (оптимальную смешанную стратегию), остаётся рассчитать создаваемые запасы топлива в соответствии с (2).

#### *Анализ результатов решения*

В случае, если результаты решения применёнными методами отличаются незначительно, следует воспользоваться решением, полученным на основе применения методов теории игр, так как в случае превышения рекомендуемых запасов топлива со стороны метода учёта только статистических данных по погодным условиям это приведёт к неоправданным финансовым затратам (памятуя о перестраховочном подходе методов теории игр). В случае же занижения рекомендуемых запасов топлива со стороны метода учёта только статистических данных по погодным условиям это может создать условия невыполнения задач, стоящих перед обслуживающими органами.

При значительном расхождении результатов решения (более 10 %) следует принять меры для проверки корректности исходных данных, и прежде всего корректности учёта особенностей маршрутов, назначенных для доставки подразделений обслуживания.

#### *Использование MS Excel для решения задачи*

В настоящее время при решении оптимизационных задач могут применяться либо программы, разработанные на одном из языков



программирования высокого уровня, либо распространённые математические пакеты (например, MathCad), либо программы общего назначения (например, электронные таблицы).

Основной программ первого типа – разработчики подобных программ являются лицами, ориентированными прежде всего на разработку эффективных алгоритмов сформулированных задач. Такие программы имеют высокую вычислительную эффективность. При использовании таких программ математическая формулировка задачи не требуется, так как уже выполнена в ходе разработки алгоритма. Пользователю лишь требуется ввести исходные данные. При этом пользовательский интерфейс таких программ является не проработанным и понятен только узкому кругу специалистов.

Распространённые математические пакеты типа потребуют задачу формализовать, что требует определённого уровня математической подготовки пользователя. Кроме того, решение оптимизационных задач в таких пакетах может быть привести к решению ряда ставляющих подзадач.

Программы общего назначения (например, электронные таблицы) обладают продуманным интерфейсом. Широкий спектр действия заложенных в них алгоритмов приводит к серьёзному ухудшению вычислительной эффективности.

Поэтому использование средств, заложенных в электронных таблицах, может представлять определённый интерес, по крайней мере, на этапе отладки разрабатываемых алгоритмов на задачах относительно небольшой размерности. В этой связи ниже рассмотрено использование MS Excel для обоснования объёмов ГСМ для обслуживающих структур с применением методов теории игр.

На рис. 1 представлена исходная платёжная матрица, её преобразование в матрицу с неотрицательными элементами, таблицы для хранения результатов промежуточных вычислений и результата.

	A	B	C	D	E	F	G
1			Исходная платёжная матрица				
2		$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$B_5$	
3	$A_1$	2	-3	4			
4	$A_2$	-3	4	-5			
5	$A_3$	4	-5	6			
6	$A_4$						
7	$A_5$						
8	$\min a_{ij} =$	-5					
9							
10		Преобразованная платёжная матрица					
11	$=B3-SB\$8$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$B_5$	
12	$A_1$	7	2	9	5	5	
13	$A_2$	2	9	0	5	5	
14	$A_3$	9	0	11	5	5	
15	$A_4$				5	5	
16	$A_5$				5	5	
17							
18		$a_{i1} * x_1$	$a_{i2} * x_1$	$a_{i3} * x_1$	$a_{i4} * x_1$	$a_{i5} * x_1$	
19		0	0	0	0	0	
20		0	0	0	0	0	
21		0	0	0	0	0	
22		0	0	0	0	0	
23		0	0	0	0	0	
24	сумма столбца =	0	0	0	0	0	
25							
26							
27		$x_1$	$p_i = x_1 * v$				
28			#ДЕЛ/0!				
29			#ДЕЛ/0!				
30			#ДЕЛ/0!				
31			#ДЕЛ/0!				
32			#ДЕЛ/0!				
33	$1/v = \sum x_i$	0					
34	$v = 1/\sum x_i$	#ДЕЛ/0!					
35	Реальный выигрыш						
36	$v + \min a_{ij}$	#ДЕЛ/0!					
37							

Рисунок 1 – Платёжная матрица

На рис. 2 представлено заполненное диалоговое окно команды ПОИСК РЕШЕНИЯ, а на рис. 3 – результат её исполнения.

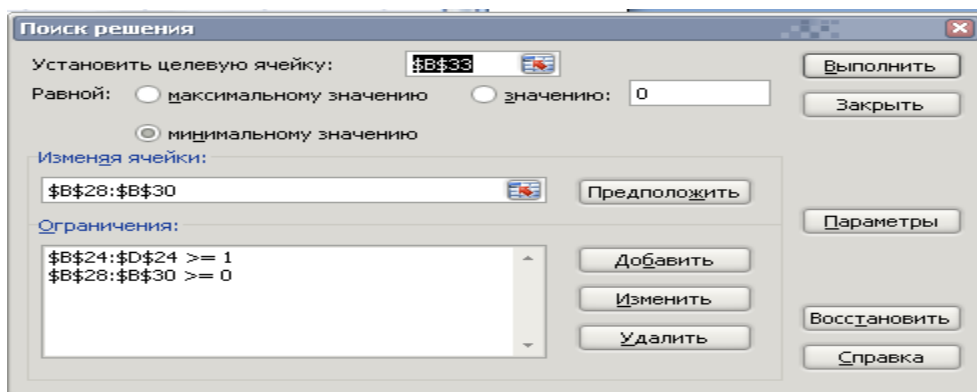


Рисунок 2 - Диалоговое окно команды ПОИСК РЕШЕНИЯ

B36		fx = =B34+B8				
A	B	C	D	E	F	G
<b>Исходная платёжная матрица</b>						
	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$B_5$	
$A_1$	2	-3	4			
$A_2$	-3	4	-5			
$A_3$	4	-5	6			
$A_4$						
$A_5$						
$\min a_{ij} =$	-5					
<b>Преобразованная платёжная матрица</b>						
	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$B_5$	
$A_1$	7	2	9	5	5	
$A_2$	2	9	0	5	5	
$A_3$	9	0	11	5	5	
$A_4$				5	5	
$A_5$				5	5	
	$a_{i1} * x_i$	$a_{i2} * x_i$	$a_{i3} * x_i$	$a_{i4} * x_i$	$a_{i5} * x_i$	
	0,35	0,1	0,45	0,25	0,25	
	0,2	0,9	0	0,5	0,5	
	0,45	0	0,55	0,25	0,25	
	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	
сумма столбца =	1	1	1	1	1	
	$x_i$	$p_i = x_i * v$				
	0,05	0,25				
	0,1	0,5				
	0,05	0,25				
		0				
		0				
$1/v = \sum x_i$	0,2					
$v = 1/\sum x_i$	5					
Реальный выигрыш = $v + \min a_{ij}$						0

Рисунок 3 – Результат решения

### Литература

- 1 Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач // М.: Наука. ГРФМЛ, 1988. – 552 с.
- 2 Золотухин В.Ф., Мартемьянов С.В., Нечитайло Н.М., Прокопец В.Н. Моделирование систем: учебное пособие // М.: МО РФ, РВИРВ. 2000. 164 с.
- 3 Нечитайло Н.М. Математические модели транспортного типа по критерию времени: монография // Рост. гос. ун-т путей сообщения. Ростов н/Д, 2007. – 146 с.: 23 ил.
- 4 Вентцель Е.С. Основы теории боевой эффективности и исследования операций // М.: Военная академия им. Жуковского Н.Е., 1961. 563 с.

- 5 Дроздов А.А., Миронюк В.П., Цыплаков В. Ю. Повышение эффективности системы двухэтапной транспортировки: на примере управления твердыми муниципальными отходами // Инженерный вестник Дона.2012. №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1078](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1078)
- 6 Зуховицкий С.И., Авдеева Л.И. Линейное и выпуклое программирование // М.: Наука, ГРФМЛ, 1969. 382 с.
- 7 Корбут А.А., Финкельштейн Ю.Ю. Дискретное программирование //М.: Наука, ГРФМЛ, 1969. 368 с.
- 8 Триус, Е.Б. Задачи математического программирования транспортного типа // М., 1967. 208 с.
- 9 Боженюк А.В., Герасименко Е.М. Разработка алгоритма нахождения максимального потока минимальной стоимости в нечеткой динамической транспортной сети // Инженерный вестник Дона. 2013. №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1583](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1583)
- 10 Гольштейн, Е.Г., Юдин Д.Б. Задачи линейного программирования транспортного типа // М.: «Наука», ГРФМЛ, 1969. 384 с.
- 11 Dantzig G.B. Application of the simplex method to a transportation problem. Activity analysis of production and allocation. ed T.C. Koopmans, Cowles Commission Monograph, 13, Wiley, New York 1951. 373 p.
- 12 Hitchcock F.L. Distribution of a product from several sources to numerous localities. J. Math. Phys., 1941, 20. 230 p.

### References

- 1 Vasil'ev F.P. Численные методы решения экстремальных задач [Numerical methods for solving extreme problems]. М.: Наука. GRFML, 1988. 552 p.

- 2 Zolotuhin V.F., Martem'janov S.V., Nechitaylo N.M., Prokopec V.N. Modelirovanie sistem: uchebnoe posobie [System Modeling: A Tutorial]. M.: MO RF, RVIRV. 2000. 164 p.
- 3 Nechitaylo, N.M. Matematicheskie modeli transportnogo tipa po kriteriyu vremeni: monografiya [Mathematical models of the transport type by the criterion of time: monograph]. Rost. gos. un-t putej soobshhenija. Rostov n/D, 2007. 146 p.
- 4 Ventcel', E.S. M. Osnovy teorii boevoy effektivnosti i issledovaniya operacij [Fundamentals of Combat Effectiveness Theory and Operations Research]. Voennaja akademija im. Zhukovskogo N.E., 1961. 563 p.
- 5 Drozdov A.A., Mironjuk V.P., Cyplakov V. Ju. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012. №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1078](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1078)
- 6 Zuhovickij S.I., Avdeeva L.I. Linejnoe i vypukloe programmirovaniye [Linear and Convex Programming]. M.: Nauka, GRFML, 1969. 382 p.
- 7 Korbut A.A., Finkel'shtejn Ju. Ju Diskretnoe programmirovaniye [Discrete programming]. M.: Nauka, GRFML, 1969. 368 p.
- 8 Trius E.B. Zadachi matematicheskogo programmirovaniya transportnogo tipa [Transport-type mathematical programming problems]. M., 1967. 208 p.
- 9 Bozhenjuk A.V., Gerasimenko E.M. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1583](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1583)
- 10 Gol'shtejn E.G., Judin D.B. Zadachi linejnogo programmirovaniya transportnogo tipa [Transport-type linear programming problems]. M.: «Nauka», GRFML, 1969. 384 p.
- 11 Dantzig G.B. Cowles Commission Monograph, 13, Wiley, New York 1951. 373 p.
- 12 Hitchcock F.L. J. Math. Phys., 1941, 20. 230 p.