

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

MATHEMATICAL MODEL OF THE FORMATION OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE OF THE LOGISTICS SYSTEM

**N. Bolgarov
A. Belov
S. Shangala
V. Lisitskiy**

Summary. The article presents a mathematical model for the formation of the transport infrastructure of the material and technical support system, for the theoretical and practical solution of transport support tasks (preparation, operation, technical cover, restoration of transport and transport communications).

Keywords: model, block linear programming, transport infrastructure, transport communications.

Болгаров Николай Игоревич

*Д.воен.н., доцент, Военная академия МТО
им. генерала армии А. В. Хрулева (Санкт-Петербург)
vamto@mail.ru*

Белов Алексей Викторович

*К.т.н., Военная академия МТО им. генерала армии
А. В. Хрулева (Санкт-Петербург)*

Шангала Сергей Витальевич

*К.т.н., преподаватель, Военная академия МТО
им. генерала армии А. В. Хрулева (Санкт-Петербург)*

Лисицкий Владимир Вадимович

*К.т.н., Военно-космическая академия
им. А. Ф. Можайского (Санкт-Петербург)
lisickii@yandex.ru*

Аннотация. В статье представлена математическая модель формирования транспортной инфраструктуры системы материально-технического обеспечения, применимая для теоретического и практического решения задач транспортного обеспечения (подготовка, эксплуатация, техническое прикрытие, восстановление транспорта и транспортных коммуникаций).

Ключевые слова: модель, блочное линейное программирование, транспортная инфраструктура, транспортные коммуникации.

Введение

Структура материально-технического обеспечения войск зависит от состава, структуры войск и способов организации материально-технического обеспечения, а именно:

- ◆ от наличия транспортных коммуникаций и их транспортно-эксплуатационного состояния;
- ◆ от требуемых объемов перевозок материально-технических средств войскам;
- ◆ от наличия соединений, частей и организаций транспортного обеспечения войск в операции;
- ◆ от характера и степени воздействия противника на транспортные коммуникации;
- ◆ от продолжительности ведения боевых действий на стратегическом направлении.

Перечисленные факторы становятся определяющими при формировании транспортной инфраструктуры материально-технического обеспечения войск. При этом необходимо комплексное использование транспорта железнодорожного, автомобильного, авиационного, водного, трубопроводного. В этом случае задача формирования системы транспортного обеспечения заключается в определении необходимого количества структурных подразделений

по каждому виду транспорта в соответствии с его возможностями

по перевозке требуемых объемов материально-технических средств в заданные сроки в боевых условиях.

Система транспортного обеспечения войск включает:

- ◆ транспортные коммуникации (военно-автомобильные и железные дороги, речные и морские пути, трубопроводы, аэродромы материального обеспечения и воздушные трассы);
- ◆ соединения, части и организации транспортного обеспечения;
- ◆ органы управления транспортного обеспечения войск.

Перечисленные элементы системы транспортного обеспечения функционируют по единому замыслу и плану, соответствующему замыслу на проведение и ее материально-техническому обеспечению.

В замысле материально-технического обеспечения войск определяются способы и сроки доставки материальных средств войскам, которые детализируются в решении на организацию транспортного обеспечения.

В решении определяются группировки сил и средств транспортного обеспечения войск и их задачи.

Исходя из этого, можно заключить, что в решении обосновывается состав транспортной инфраструктуры группировки войск. Причем определение состава сил и средств транспортного обеспечения сводится к расчету потребности в соединениях, частях и организациях транспортного обеспечения в соответствии с объемами перевозимых материальных средств, интенсивностью движения и пропускной способностью существующей сети транспортных коммуникаций.

Таким образом, проблему формирования транспортной инфраструктуры можно свести к отысканию необходимого количества структурных подразделений (соединений, частей, организаций), способных обеспечить выполнение заданных объемов перевозок при комплексном использовании транспорта в условиях воздействия противника с учетом максимального использования потенциальной пропускной способности транспортных коммуникаций и минимальных затрат на формирование транспортной инфраструктуры СТО (система материально-технического обеспечения).

В соответствии с этим проектирование системы транспортного обеспечения основано на описании процесса ее функционирования как решение некоторой глобальной задачи, реализация которой в едином блоке (одним структурным подразделением) невозможна. Требуется разбиение общей задачи транспортного обеспечения войск на подзадачи и создание специализированных структурных подразделений СТРО (система транспортного обеспечения) соединений, частей и орга-

низаций для решения выделенных подзадач. В последующем структурные подразделения объединяются в единую транспортную систему войск. При этом возможны два способа формирования транспортной инфраструктуры СТО.

Первый из них состоит в том, что предполагается использование известного числа структурных элементов СТРО и их специализация по видам транспорта.

В этом случае количество подзадач транспортного обеспечения войск (сил) и характер взаимоотношения между ними определены заранее так, что проводится распределение усилий между уже выделенными структурными элементами СТРО (соединениями, частями, организациями).

При втором способе предполагается, что никакие параметры СТРО (число структурных подразделений, количество уровней иерархии и др.) заранее неизвестны и декомпозиция общей задачи осуществляется исходя из возможности решения выделенных подзадач СТРО.

Как первый, так и второй способы укладываются в рамки решения общей распределительной задачи линейного или блочного линейного программирования.

Постановка задачи проектирования системы транспортного обеспечения группировки войск (сил) с применением принципов математического (линейного) программирования требует выполнить ряд последовательных шагов.

Шаг 1. Разбить общую задачу (цель) проектируемой системы транспортного обеспечения на элементарные подзадачи (цели), реализация которых осуществляется «низовыми элементами» (в качестве «низовых элементов» могут выступать отдельные должностные лица и привлекаемая техника, подразделения (отделение, взвод, рота), части (отдельные батальоны) и соединения) структуры.

Естественно, существует несколько способов достижения элементарных подзадач (целей) транспортного обеспечения. Это означает, что для выполнения каждой из них может быть сформировано несколько вариантов «низовых элементов», образующих множество X .

Каждый из вариантов $x_i \in X$ имеет свои специфические особенности и отличается от всех других возможностями по выполнению задач, экономичностью, надежностью, управляемостью и др. показателями.

Формирование множества «низовых элементов» осуществляется исходя из реально имеющихся (прогнозируемых) ресурсов видов транспорта и может быть выполнено:

1. на основе анализа существующих структурных подразделений транспортного обеспечения войск;
2. на основе расчетов с использованием существующих методик [1, 2] определения состава специализированных подразделений;
3. с помощью предлагаемой методики.

Использование первого способа целесообразно при выборе таких исходных вариантов «низовых элементов», как части и подразделения автомобильных, дорожных и железнодорожных войск, органы ВОСО и др.

Применение второго и третьего способов имеет смысл при расчете вариантов специализированных структурных подразделений СТРО для выполнения специальных работ и задач, отличающихся определенной спецификой (например, дорожное обеспечение работы временных пунктов разгрузки (ВПР)). Иными словами, расчет вариантов «низовых элементов» необходим в том случае, когда подобные аналоги отсутствуют или их эффективность неизвестна.

Итогом данного этапа методики должно стать множество X вариантов «низовых элементов» создаваемой системы транспортного обеспечения. Элементы множества X являются искомыми переменными модели.

Шаг 2. Сформировать систему ограничений, накладываемых на транспортную инфраструктуру СМТО.

Эти ограничения формируются для всех переменных модели и системы транспортного обеспечения в целом. Они обусловлены требованиями к ней. В свою очередь сами требования определяются целями и условиями организации транспортного обеспечения войск.

Ограничения, характерные для работы СТРО, можно разделить на несколько групп (подмножеств):

- ◆ затраты на создание, содержание и функционирование $\{C\}$;
- ◆ требуемые объемы задач транспортного обеспечения (объемы перевозок различными видами транспорта, подготовка, эксплуатация, техническое прикрытие, разграждение и заграждение железных дорог) материальных средств и их структура $\{Q\}$;
- ◆ допустимые сроки выполнения воинских перевозок $\{T\}$;
- ◆ объемы и структура работ по обеспечению работы системы транспортного обеспечения $\{O\}$.

В свою очередь, каждое из этих подмножеств в зависимости от специфики создаваемых структурных подразделений СТРО распадается на более мелкие

подмножества. Такая декомпозиция ограничений продолжается до тех пор, пока не будут определены требования к «низовым элементам» проектируемой системы транспортного обеспечения. Таким образом, система ограничений имеет иерархическую структуру, отражающую иерархию создаваемой структуры транспортного обеспечения.

Основной принцип построения этой иерархии состоит в том, что общие требования $B = \{Q, T, O, \dots\}$, предъявляемые к СТРО, в целом достигаются за счет выполнения частных требований b_{ir} , накладываемых на структурные элементы (здесь i и r — тип «низового элемента» и накладываемого на него ограничения соответственно).

Формированием системы ограничений вида $B = \cup b_{ir}^q$, (где q — индекс уровня иерархии) заканчивается второй этап формирования системы транспортного обеспечения.

Шаг 3. Определить коэффициенты ограничений модели –показатели a_{ij} , количественные значения которых соответствуют вкладу каждого j -го ($j=1, \dots, m$) варианта «низового элемента» СТРО x_{ij} в выполнение r -го требования к ней.

Шаг 4. Составить уравнения ограничений, каждое из которых утверждает, что алгебраическая сумма вкладов каждого «низового элемента» в достижение одного из требований (Q, T, \dots) больше либо равна (меньше либо равна) его численному значению.

При этом «вклад» представляет собой произведение коэффициента ограничений a_{ij} на количество x_{ij} структурных подразделений j -го вида.

Шаг 5. Определить уравнение целевой функции системы транспортного обеспечения, позволяющее выбрать из всех допустимых переменных x_{ij} те, которые будут соответствовать лучшему (наиболее эффективному) варианту СТРО.

Эффективность измеряется либо количеством затрат, необходимых для получения определенного результата, либо результатом, полученным при определенных затратах [3]. Для исследования адаптивности СТРО наиболее предпочтительным является критерий затрат. В соответствии с этим уравнение целевой функции представляет собой минимизацию алгебраической суммы расходов, выраженных в виде произведения коэффициента затрат c_{ij} на количество x_{ij} структурных элементов системы транспортного обеспечения i -го типа в j -м виде транспорта, т.е.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min.$$

Таким образом, в результате построения модели получается совокупность математических соотношений, описывающих все допустимые варианты создаваемой системы транспортного обеспечения. Совокупность этих уравнений является моделью линейного программирования.

После того, как модель построена, задача формирования транспортной инфраструктуры СМТО может быть сформулирована в математических терминах.

Пусть для достижения какой-либо цели системы транспортного обеспечения G_o требуется сформировать транспортную инфраструктуру СМТО, удовлетворяющую требованиям $B = \|b_i\|$, ($i = 1, \dots, n$). Количественные значения этих требований (структуры и объемов перевозок, затрат ресурсов и др.) считаются известными или могут быть вычислены.

Для достижения цели G_o имеются определенные ресурсы, что позволяет создать множество вариантов X «низовых элементов» и транспортной инфраструктуры в целом. Варианты «низовых элементов» (x_{ij}) отличаются друг от друга показателями экономичности c_{ij} , возможностями по выполнению объемов перевозок (работ) a_{ij} , сроками выполнения перевозок (работ) t_{ij} , и др. Совокупность этих показателей определяется числом требований, предъявляемых к структуре СТрО.

Требуется определить такой состав системы транспортного обеспечения (количество, специализацию и иерархию «низовых элементов»), при которой обеспечивается выполнение требований

к транспортному обеспечению $B = \|b_i\|$ с минимальными затратами.

Формальную постановку этой задачи можно записать в следующем виде. Минимизировать целевую функцию

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \tag{1}$$

при следующих ограничениях:

$$\sum_{j=1}^m a_{ij} x_{ij} \geq b_i, \tag{2}$$

$$\sum_{j=1}^m a_{ij}^{r \text{ факсм}} x_{ij} \geq b_{ir}, \tag{3}$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} \geq 1, \tag{4}$$

$$x_{ij} \text{ — целочисленные для } \forall ij, \tag{5}$$

$$x_{ij} \geq 0, \tag{6}$$

$$x_{ij} \leq v_{ij}, \tag{7}$$

где i — индекс специализации (по видам транспорта, специализированных соединений, частей, организаций и др.) «низового элемента» СТрО и вида требований к структуре, выполнение которых необходимо для достижения цели G_o ;

j — индекс варианта (тип соединения, части, организации, характеризующий их предназначение и возможности) «низового элемента» i -го вида транспорта;

x_{ij} — количество «низовых элементов» СТрО i -го вида транспорта j -го типа;

c_{ij} — суммарные приведенные затраты по i -му виду и j -му типу (варианту) «низового элемента» СТрО;

b_{ir} — численное значение r -го требования к СТрО по i -му виду транспорта;

a_{ij} и $a_{ij}^{r \text{ факсм}}$ — соответственно нормативные и потенциальные возможности элемента x_{ij} по выполнению i -го требования;

v_{ij} — верхняя граница возможного изменения переменной x_{ij} , которая определяется нормой управляемости.

Перечисленные выше ограничения задачи интерпретируются следующим образом:

- ♦ целевая функция (1) минимизирует затраты на создание, содержание и функционирование транспортной инфраструктуры СМТО;
- ♦ условия (2–3) определяют выполнение всех требований, предъявляемых к транспортной инфраструктуре СМТО;
- ♦ условие (4) гарантирует включение в состав СТрО не менее одного «низового элемента»;
- ♦ условия (5–6) учитывают целочисленность и неотрицательность переменных x_{ij} ;
- ♦ условие (7) устанавливает максимальное количество структурных подразделений СТрО (элементов) нижестоящего уровня иерархии в структуре вышестоящего уровня.

Такая постановка задачи хорошо описывает процесс формирования элемента транспортной инфраструктуры СМТО для перевозок отдельными видами транспорта и предназначена для решения задач небольшой размерности (при небольшом количестве переменных и ограничений модели). Для формирования транспортной инфраструктуры СМТО с учетом реализации требования комплексного использования всех видов транспорта размерность задачи резко возрастает. В этом случае целесообразно сформулировать проблему формирования СТрО группировки войск в обобщенном виде следующим образом.

Пусть существует задача создания транспортной инфраструктуры СМТО в виде модели линейного программирования в векторной форме

$XC \rightarrow \min$ при условиях:

$$\begin{cases} AX = B \\ X \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

где $X = (x_1, \dots, x_n)^T$ — структурные подразделения СТРО по видам транспорта;

$C = (c_1, \dots, c_n)$ — затраты на создание, содержание и функционирование СТРО;

$A = \| a_{ij} \|$, $(i=1, \dots, n), (j=1, \dots, m)$ — коэффициенты ограничений, характеризующие возможности структурных подразделений по выполнению задач транспортно-обеспечения и потребности ресурсов для выполнения этих задач;

$B = (b_1, \dots, b_n)$ — показатели, определяющие условия функционирования СТРО и требования к ней (объемы перевозок по видам транспорта, объемы работ по техническому прикрытию, восстановлению транспортных коммуникаций, ограничения на выделяемые ресурсы и др.).

Разобьем множество X — совокупность «низовых элементов» СТРО на Z подмножеств совокупности структурных подразделений СМТО по видам транспорта, представив вектор X в виде $X = (x^1, x^2, \dots, x^t, \dots, x^Z)^T$, где $x^t = (x_1^t, \dots, x_{n_t}^t)^T$. Аналогично представим B и C в виде:

$$B = (b^0, b^1, b^2, \dots, b^t, \dots, b^Z)^T,$$

$$C = (c^1, c^2, \dots, c^t, \dots, c^Z),$$

где $b^t = (b_1^t, \dots, b_{m_t}^t)^T$, $c^t = (c_1^t, \dots, c_{n_t}^t)$, $b^0 = (b_1^0, \dots, b_l^0)^{\delta}$, $t=1, \dots, Z$.

Представим матрицу ограничений как совокупность

некоторых блоков A^t и D^t , $t=1, \dots, Z$ в виде

$$A = \begin{pmatrix} A^1 & A^2 & \dots & A^t & \dots & A^Z \\ D^1 & & & & & \\ & D^2 & & & & \\ & & \ddots & D^t & & \\ & & & & \ddots & D^Z \end{pmatrix},$$

где $A^t = \| a_{ij}^t \|$, $(i=1, \dots, l_t), (j=1, \dots, m_t)$;

$D^t = \| d_{ij}^t \|$, $(i=1, \dots, n_t), (j=1, \dots, m_t)$.

Тогда задачу (8) можно представить в следующем виде: минимизировать

$$F = C^1 X^1 + C^2 X^2 + \dots + C^t X^t + \dots + C^Z X^Z$$

при ограничениях:

$$A^1 X^1 + A^2 X^2 + \dots + A^t X^t + \dots + A^Z X^Z = b^0$$

$$D^1 X^1 = b^1$$

$$D^2 X^2 = b^2$$

$$\ddots D^t X^t = b^t$$

$$\ddots D^Z X^Z = b^Z,$$

$$X^t \geq 1, X^t \leq V^t.$$

Переменные, параметры и ограничения этой задачи имеют следующее значение:

X^t — вектор допустимых вариантов транспортной инфраструктуры СМТО, создаваемой для решения t -ой задачи транспортного обеспечения (по t -му виду транспорта);

C^t — вектор затрат, связанных с созданием, содержанием и функционированием вариантов транспортной инфраструктуры СМТО для решения t -ой задачи транспортного обеспечения (по t -му виду транспорта);

D^t — матрица коэффициентов ограничений, характеризующих «вклад» каждого варианта транспортной инфраструктуры СМТО в выполнение накладываемых на нее ограничений (требований) по решению t -ой задачи транспортного обеспечения (по t -му виду транспорта);

b^t — вектор объемов ограничений, накладываемых на элементы транспортной инфраструктуры СМТО, создаваемых для решения t -ой задачи транспортного обеспечения (по t -му виду транспорта);

A^t — матрица коэффициентов ограничений, характеризующих «вклад» каждого элемента по решению t -ой задачи в достижение общих требований, предъявляемых к транспортной инфраструктуре СМТО в целом;

Z — количество задач, требующих создания структурных элементов.

После приведенных объяснений для удобства следует записать эту модель в более краткой векторной форме

$$\left. \begin{aligned} \sum_{t=1}^Z X^t C^t \xrightarrow{x} \min \\ \text{при условиях} \\ \sum_{t=1}^Z A^t X^t = b^0, D^t X^t = b^t \\ X^t \geq 1, \quad X^t \leq V^t \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Заключение

Основные преимущества обобщенной постановки задачи формирования транспортной инфраструктуры

СМТО состоят в возможности отдельного решения задач по формированию отдельных элементов и всей создаваемой транспортной инфраструктуры.

В первом случае учитываются лишь частные ограничения, накладываемые на структурные подразделения, во втором — кроме частных, необходимо учесть общие ограничения для создаваемой транспортной инфраструктуры СМТО.

Это позволяет:

- ◆ во-первых, научно обосновать состав и структуру транспортной инфраструктуры СМТО группировки войск с учетом комплексного использования всех видов транспорта в операции по единой методике;
- ◆ во-вторых, реализовать принципы системного подхода к управлению транспортным обеспечением войск (сил) во всех формах применения группировок Вооруженных сил Российской Федерации;
- ◆ в-третьих, обеспечивает возможность оптимизации системы транспортного обеспечения войск по критерию оптимизации затрат (по содержанию, созданию и т.д.) при непереносимом условии выполнения задач транспортного обеспечения в требуемые сроки;
- ◆ в-четвертых, разбиение задачи линейного программирования на почти независимые подзадачи, и главную задачу, и возможность их отдельного решения очень выгодны с вычислительной точки зрения для подготовки исходных данных и сокращения времени расчетов.

Таким образом, приведенные обстоятельства, а также наличие доступных и эффективных методов решения задач блочного линейного программирования и стандартных алгоритмов и программ их машинной реализации делают обобщенную постановку задачи формирования транспортной инфраструктуры СМТО более предпочтительной. В качестве метода ее решения выбран метод декомпозиции Данцига-Вулфа [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Мальцев, Ю. А. Экономико-математические методы проектирования транспортных сооружений: учебник / Ю. А. Мальцев. — М.: Академия, 2010. — 346 с.
2. Ермошин, Н. А. Методы адаптивного управления транспортно-логистическими системами: монография / Н. А. Ермошин. — СПб.: СПбГУ сервиса и экономики, 2011. — 160 с.
3. Акофф, Р. О целеустремленных системах / Р. Акофф, Ф. Эмери; под ред. И. А. Ушакова. — М.: Советское Радио, 1974. — 272 с.
4. Данциг, Дж. Линейное программирование, его применения и обобщения / под ред. Н. Н. Воробьева. — М.: Прогресс, 1966. — 599 с.

© Болгаров Николай Игоревич (vamto@mail.ru), Белов Алексей Викторович, Шангала Сергей Витальевич,

Лисицкий Владимир Вадимович (lisickii@yandex.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»