ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ВАРИАНТОВ ПОДВОЗА МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ В УСЛОВИЯХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ РЕГИОНАЛЬНОГО ХАРАКТЕРА НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

В.Б. Вилков, кандидат технических наук, доцент.
Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва.
И.В. Козлова.
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Представлен подход, реализующий на основе математического аппарата теории нечетких множеств прогнозирование вариантов подвоза материально-технических средств в условиях чрезвычайных ситуаций регионального характера. Определена математическая модель, позволяющая в условиях представления потребностей сил и средств МЧС России в виде нечетких чисел находить оптимальный вариант подвоза материальных средств указанным потребителям, и предложен метод реализации этой модели.

Ключевые слова: варианты подвоза материально-технических средств, оптимальное решение нечеткой транспортной задачи, нечеткое множество, нечеткое число, функция принадлежности

FORECAST OF THE OPTIMAL OPTIONS OF DELIVERY OF MATERIAL SUPPLY UNDER CONDITIONS OF REGIONAL EMERGENCY ON THE BASIS OF THE FUZZY SET THEORY

V.B. Vilkov. Military academy of logistics of general of the army A.V. Khrulyov.
I.V. Kozlova. Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

The approach realizing on the basis of mathematical apparatus of the theory of indistinct sets, forecasting of options of transportation of material means in the conditions of emergency situations of regional character is presented. The mathematical model allowing in the conditions of representation of requirements of forces and means of EMERCOM of Russia in the form of indistinct numbers to find optimum option of transportation of appliances to the specified consumers is defined, and the method of realization of this model is offered.

Keyword: options of transportation of material means, optimum solution of an indistinct transport task, indistinct set, indistinct number, function of accessory

В соответствии с Федеральным законом Российской Федерации от 21 декабря 1994 г. № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» [1] под чрезвычайной ситуацией (ЧС) природного и техногенного характера понимается обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушения условий жизнедеятельности людей [1].

По данным МЧС России, в нашей стране ежегодно происходит 300–350 стихийных бедствий и свыше 600 техногенных аварий. В последние годы количество и масштабы последствий аварий, катастроф и стихийных бедствий становятся все более опасными для населения, окружающей среды и экономики страны [2].

В соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 21 мая 2007 г. № 304 «О классификации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» по масштабам распространения и тяжести последствий ЧС природного и техногенного характера подразделяются на ЧС локального характера, ЧС муниципального характера, ЧС межмуниципального характера, ЧС регионального характера, ЧС межрегионального характера, ЧС федерального характера [3].

ЧС регионального характера – те ЧС, в результате которых зона ЧС не выходит за пределы одного субъекта РФ, при этом количество пострадавших составляет свыше 50 человек, но не более 500 человек либо размер материального ущерба составляет свыше 5 млн руб., но не более 500 млн руб. [3].

Единая государственная система предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС) объединяет органы управления, силы и средства федеральных органов исполнительной власти, органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления, организаций, в полномочия которых входит решение вопросов по защите населения и территорий от ЧС, в том числе по обеспечению безопасности людей на водных объектах [1].

Работа по ликвидации последствий ЧС, жизнеобеспечению пострадавшего населения будет успешной тогда, когда все участники ликвидации последствий ЧС в полном объеме и своевременно обеспечены всем необходимым для своевременного выполнения работ и действий в ЧС, имеют приемлемые условия для жизни и деятельности: обеспечены продовольствием, вещевым имуществом, горючим и смазочными материалами, материальными средствами для восстановления разрушенных объектов, местами для проживания, обогрева и отдыха и прочим имуществом [4].

Одним из основных мероприятий, выполняемых в интересах планомерной работы МЧС России, является «Эффективное материально-техническое обеспечение системы гражданской обороны, защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, обеспечения пожарной безопасности и безопасности людей на водных объектах» [5]. Для эффективной реализации указанного мероприятия необходимо своевременное и качественное планирование осуществления закупок и беспрепятственного подвоза материально-технических средств в целях поддержания требуемого уровня продовольственного и вещевого обеспечения, наличия горюче-смазочных материалов и специального оборудования, необходимых для всестороннего и своевременного материально-технического обеспечения системы предупреждения и ликвидации ЧС, защиты населения и территорий от ЧС, обеспечения пожарной безопасности и безопасности людей на водных объектах. Последнее позволяет также определить уровень обеспеченности подразделений и организаций МЧС России специальным оборудованием для действий в особых условиях, а также при ликвидации крупномасштабных ЧС и террористических актов.

Материально-техническое обеспечение РСЧС МЧС России представляет собой комплекс мероприятий по обеспечению вооружением, военной и специальной техникой, горючим и смазочными материалами, продовольствием, вещевым и другим имуществом и техническими средствами, поддержанию запасов материальных средств и технических средств в состоянии, обеспечивающем постоянную готовность сил и средств МЧС России к выполнению задач по предназначению.

Основная цель организации материального обеспечения на территории региона – проведение комплекса мероприятий материального обеспечения аварийно-спасательных и других незамедлительных работ при возникновении ЧС и ликвидации их последствий, которое организуется соответствующими территориальными и функциональными подсистемами РСЧС.

Прогнозируя процессы материального обеспечения сил и средств МЧС России, выполняющих задачи по ликвидации последствий ЧС регионального характера, необходимо использовать математические модели рассматриваемых процессов, многие исходные данные которых невозможно задать точно. Поэтому подход, основанный на теории нечетких множеств [6], обеспечивающий в этих условиях оптимизацию прогноза материального обеспечения сил и средств МЧС России, выполняющих задачи по ликвидации последствий ЧС регионального характера, представляется, по нашему мнению, весьма актуальным.

В указанных выше целях рассмотрим транспортную задачу линейного программирования [7–9], в которой потребности являются нечеткими и задаются с помощью нечетких чисел.

Введем обозначения рассматриваемой транспортной модели (задачи) линейного программирования:

– в пунктах $A_1, A_2, ..., A_m$ расположены склады с материальными средствами в количествах $a_1, a_2, ..., a_m$ (т) соответственно;

– в пунктах $B_1, B_2, ..., B_n$ находятся потребители этих материальных средств, их потребности равны соответственно $b_1, b_2, ..., b_n$ (т);

– известны транспортные издержки по доставке единицы груза с любого склада любому потребителю (расстояния между пунктами, стоимость доставки, единица материальных средств и т.п.). Издержки по доставке единицы груза со склада A_i потребителю B_j ($i = 1, 2, ..., m;\ j = 1, 2, ..., n$) будем обозначать c_{ij}.

Найти план подвоза материальных средств со складов потребителям, требующий минимальных суммарных затрат и обеспечивающий потребности каждого потребителя.

Математическая модель этой задачи имеет вид:

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} c_{ij} x_{ij} \to min, \qquad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{m} x_{ij} \geq b_j,\ j = 1, 2, ..., n, \qquad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} \leq a_m,\ i = 1, 2, ..., m, \qquad (3)$$

$$x_{ij} \geq 0, i = 1, 2, ..., m,\ j = 1, 2, ..., n, \qquad (4)$$

где x_{ij} – объем подвоза со склада A_i потребителю B_j.

Значения x_{ij} (i=1,2, …, m, j=1,2, …, n) определяют оптимальный план подвоза. Их совокупность будем обозначать символом $\overline{x}$ и называть планом:

$$\overline{x} = \{x_{11}, x_{12}, ..., x_{1n}, x_{21}, ..., x_{2n}, ..., x_{m1}, ..., x_{mn}\}.$$

С целью использования в дальнейшем приведем необходимые понятия из теории нечетких множеств [10, 11].

Нечетким множеством $\hat{A}$ на универсальном множестве U называется совокупность пар $(h_{\hat{A}}(u), u)$, где $h_{\hat{A}}(u)$ – функция принадлежности, которая указывает степень принадлежности произвольного элемента универсального множества к нечеткому множеству $\hat{A}$. Степень принадлежности – это число из отрезка $[0;1]$. Чем выше степень принадлежности, тем больше элемент универсального множества соответствует свойствам нечеткого множества.

Пересечением нечетких множеств $\hat{A}$ и $\hat{B}$, заданных на U, называется нечеткое множество $\hat{C} = \hat{A} \bigcap \hat{B}$ с функцией принадлежности $h_{\hat{C}}(u) = min\{h_{\hat{A}}(u), h_{\hat{B}}(u)\}$ для всех $u \in U$.

Объединением нечетких множеств $\hat{A}$ и $\hat{B}$, заданных на U, называется нечеткое множество $\hat{D} = \hat{A} \bigcup \hat{B}$ с функцией принадлежности $h_{\hat{D}}(u) = max\{h_{\hat{A}}(u), h_{\hat{B}}(u)\}$ для всех $u \in U$.

Для задания потребностей будем использовать развитый в рамках теории нечетких множеств аппарат нечетких чисел [11, 12]. Ограничимся треугольными нечеткими числами.

Треугольным нечетким числом V называется тройка $\langle a,b,c \rangle$, $(a \le b \le c)$ действительных чисел, через которые его функция принадлежности h_V определяется следующим образом:

$$h_V(x) = \begin{cases} \dfrac{x-a}{b-a}, \text{ если } x \in [a;b], \\ \dfrac{x-c}{b-c}, \text{ если } x \in [b;c], \\ 0, \text{ иначе.} \end{cases}$$

Второе число b тройки $\langle a,b,c \rangle$ обычно называют модой или четким значением нечеткого треугольного числа. Числа a и c характеризуют степень размытости (нечеткости) четкого числа.

Если $b = c$, то получаем треугольное число $\langle a,b,b \rangle$ с функцией принадлежности:

$$h_V(x) = \begin{cases} \dfrac{x-a}{b-a}, \text{ если } x \in [a;b], \\ 1, \text{ если } x \ge b, \\ 0, \text{ иначе.} \end{cases}$$

Аналогичным образом строится функция принадлежности и в случае нечеткого числа $\langle a,a,b \rangle$.

Сформулируем постановку следующей нечеткой задачи.

Предположим, что снабжение n потребителей материальными средствами производится с m складов (баз), их потребности равны примерно $b_1, b_2, ..., b_n$ и являются нечеткими числами $\langle b_j - l_j, b_j, b_j \rangle$, $j = 1, 2, ..., n$. Запасы на складах равны соответственно $a_1, a_2, ..., a_m$ (т) и являются обычными четкими числами, при этом для удовлетворения потребностей в указанных объемах, со значениями функций принадлежности, равными единице, запаса не хватает, то есть:

$$\sum_{j=1}^{n} b_j > \sum_{i=1}^{m} a_i .$$

Предположим также, что потребитель с номером j готов согласиться на некоторое уменьшение своих потребностей по сравнению с величиной b_j и l_j – максимальная величина недопоставки, на которую может согласиться этот потребитель, причем запасов достаточно для обеспечения минимальных потребностей всех потребителей.

Чем больше дефицит, тем меньше значение функции принадлежности, которую будем трактовать как степень уверенности в том, что потребитель удовлетворен. Обозначать функцию принадлежности нечеткого числа b_j будем $h_{b_j}(x)$.

Требуется найти вариант снабжения, при котором степень уверенности (значение функции принадлежности) в том, что он эффективен по затратам и уровню обеспечения потребителей максимальна (например [13]).

Обозначим через C_{min} – минимальные суммарные расходы по доставке грузов для случая, когда потребности потребителей минимальны, то есть равны $b_j - l_j$, $j = 1, 2, ..., n$. Степень уверенности в том, что предлагаемый вариант организации подвоза эффективен, будем характеризоваться значением функции принадлежности получаемых затрат, равной нечеткому числу $c_ц$ – «расходы почти минимальны», описывающему нашу цель.

Чем больше разность между затратами:

$$C(\overline{x}) = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} c_{ij} x_{ij}$$

для варианта $\overline{x}$ и величиной C_{min}, то есть разность $C(\overline{x}) - C_{min}$, тем меньше мы уверены в том, что план $\overline{x}$ экономически эффективен.

Определим $C_ц$ как нечеткое треугольной число $\langle C_{min}, C_{min}, C_{max} \rangle$ с функцией принадлежности $h_ц(\overline{x})$, где C_{max} – минимальные расходы, являющиеся решением задачи (1–4) (предполагается наличие фиктивного склада, например [6]).

Рассмотрим ограничения:

$$\sum_{i=1}^{m} x_{ij} \geq b_j,\ j = 1, 2, ..., n.$$

С учетом того, что b_j – нечеткие числа, эти ограничения задают нечеткие множества с функциями принадлежности h_j:

$$h_j(\overline{x}) = \begin{cases} 1,\ если\ \sum_{i=1}^{m} x_{ij} \geq b_j, \\ h_{b_j}\left(\sum_{i=1}^{m} x_{ij}\right),\ если\ \sum_{i=1}^{m} x_{ij} < b_j. \end{cases}$$

Оптимальный вариант должен принадлежать, согласно работе [12], всем указанным нечетким множествам и, кроме того, он должен принадлежать нечеткому множеству цели с функцией принадлежности $h_ц(\bar{x})$, то есть он должен принадлежать пересечению указанных нечетких множеств. Функция принадлежности этого пересечения имеет вид:

$$h_{\cap}(\bar{x}) = min\{h_ц(\bar{x}), h_1(\bar{x}), \ldots, h_n(\bar{x})\}.$$

Отметим, что функция $h_{\cap}(\bar{x})$ характеризует степень нашей уверенности в том, что план $\bar{x}$ эффективен по суммарным затратам и уровню обеспечения потребителей. Мы же стремимся степень этой уверенности максимизировать.

Вышесказанное позволяет привести следующую постановку модели:

$$min\{h_ц(\bar{x}), h_1(\bar{x}), \ldots, h_n(\bar{x})\} \to max, \tag{5}$$

$$\sum_{i=1}^{m} x_{ij} \geq b_j,\ j = 1, 2, \ldots, n, \tag{6}$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} \leq a_m,\ i = 1, 2, \ldots, m, \tag{7}$$

$$x_{ij} \geq 0,\ i = 1, 2, \ldots, m,\ j = 1, 2, \ldots, n. \tag{8}$$

Заметим, что в отличие от задачи (1–4) правые части неравенств из (6) являются нечеткими числами.

Предположим:

$\bar{x}^* = \left(x_{11}^*, x_{12}^*, \ldots, x_{1n}^*, \ldots, x_{mn}^*\right)$ – оптимальный план задачи (5–8),

$$min\left\{h_ц\left(\bar{x}^*\right), h_1\left(\bar{x}^*\right), h_2\left(\bar{x}^*\right), \ldots, h_n\left(\bar{x}^*\right)\right\} = I,$$

$$\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^* = b_j^*,\ j = 1, 2, \ldots, n.$$

Очевидно, что $\bar{x}^*$ является решением следующей задачи с четкими ограничениями:

$$min\{h_ц(\bar{x}), h_1(\bar{x}), \ldots, h_n(\bar{x})\} \to max, \tag{9}$$

$$\sum_{i=1}^{m} x_{ij} \geq b_j^*,\ j = 1, 2, \ldots, n, \tag{10}$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} \leq a_m,\ i = 1, 2, \ldots, m, \tag{11}$$

$$x_{ij} \geq 0,\ i = 1, 2, \ldots, m,\ j = 1, 2, \ldots, n. \tag{12}$$

Теорема. План $\bar{x}^*$ является решением задачи (9–12) и в случае, когда правые части всех ограничений из (10) таковы, что $h_{b_j}\left(b_j^*\right) = I$.

Доказательство.

Так как меньшим значениям функций принадлежности соответствуют меньшие значения правых частей ограничений из (6), то $I \le h_{b_j}\left(b_j^*\right)$, $j = 1,2,...,n$.

Следовательно, при замене в (6) чисел $b_j^*, j = 1,2,...,n$ на такие числа $\tilde{b}_j$, что $h_{b_j}\left(\tilde{b}_j\right) = I$, множество допустимых планов получившейся задачи будет содержать в себе все допустимые планы задачи (9–12) (если вариант допустим в некоторой задаче, то он допустим и в аналогичной задаче с меньшими потребностями). Значит при такой замене значение целевой функции задачи (9–12) не может ухудшиться, то есть стать меньше I. Это и завершает доказательство.

Для приближенного решения задачи (5–8) можно предложить следующий алгоритм.

Обозначим целевую функцию $min\left\{h_ц\left(\bar{x}\right), h_1\left(\bar{x}\right), ..., h_n\left(\bar{x}\right)\right\}$ задачи (5–8) через $h_з\left(\bar{x}\right)$.

Будем менять значение целевой функции с определенным шагом, равным $e = \dfrac{1}{N}$, где N – число шагов.

На k-м шаге ($0 \le k \le N$) решаем задачу (1–4), в которой правые части ограничений из формулы (2), равные b_j, заменены на числа, равные b_j^k, где $h_j\left(b_j^k\right) = ke.$

Пусть оптимальное значение целевой функции построенной задачи равно C_k. Тогда значение целевой функции задачи (9–12) при правых частях в (10) равных b_j^k равно:

$$min\left\{\frac{C_{max} - C_k}{C_{max} - C_{min}}, ke, ke, ..., ke\right\}.$$

Из полученных $(N+1)$ результатов выбираем максимальный, это и будет приближенное решение задачи (5–8).

Литература

1. О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера: Федер. закон Рос. Федерации от 21 дек. 1994 г. № 68-ФЗ // Собр. законодательства Рос. Федерации. 1994. № 35. Ст. 3648.

2. МЧС России. URL: http://www.mchs.gov.ru (дата обращения: 12.03.2015).

3. О классификации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера: Постановление Правительства Рос. Федерации от 21 мая 2007 г. № 304 // Собр. законодательства Рос. Федерации. 2007. № 22. Ст. 2640.

4. Радоуцкий В.Ю., Шаптала В.В. Материально-техническое обеспечение мероприятий ГО и РСЧС: учеб. пособие / под ред. В.Ю. Радоуцкого. Белгород: Белгород. гос. техн. ун-т, 2011. 134 с.

5. Защита населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, обеспечение пожарной безопасности и безопасности людей на водных объектах: Постановление Правительства Рос. Федерации от 15 апр. 2014 г. № 300 // Собр. законодательства Рос. Федерации. № 18. Ч. 1. Ст. 2149.

6. Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Vol. 8. № 3.

7. Основы математического моделирования: учеб. пособие. СПб.: ВАТТ, 1996.

8. Черных А.К., Козлова И.В. Подход к моделированию системы управления материально-техническим обеспечением сил и средств МЧС России в условиях чрезвычайных ситуаций регионального характера // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2015. № 2. С. 65–70.

9. Черных А.К., Копкин Е.В., Скопцов А.А. Прогнозирование управления перевозками в условиях чрезвычайной ситуации регионального масштаба на транспорте // Проблемы управления рисками в техносфере. № 2 (34). 2015. С. 56–65.

10. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. М.: Радио и связь, 1982.

11. Яхъяева Г.Э. Нечеткие множества и нейронные сети. М.: Бином, 2006.

12. Штовба С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. Винница: УНИВЕРСУМ-Винница, 2001.

13. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. М.: Наука, 1981.