Коданова Шынар Кулмаганбетовна
канд. техн. наук, доцент
Кусмолдина Жанар Оралбаевна
старший преподаватель
Завьялова Галия Исламовна
старший преподаватель
Атырауский институт нефти и газа
г. Атырау, Республика Казахстан

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ СИЛ ЛИКВИДАЦИИ И ПОСЛЕДСТВИЙ РАЗЛИВОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ НА АКВАТОРИИ СЕВЕРНОГО КАСПИЯ

Аннотация*: в статье рассматривается методика моделирования и определения оптимального распределения теплоходов с различными тактико-техническими характеристиками между пунктами базирования в различных зонах ответственности по акватории Северного Каспия.*

Ключевые слова*: нефтяное пятно, нефтепродукт, нефтесборщик, ликвидация аварийных разливов.*

Оптимальная дислокация ограниченного состава нефтесборщиков на акватории Северного Каспия представляет собой задачу из класса оптимального размещения запасов, осложнённую цело численностью аргументов, стохастичностью и нечеткостью некоторых, параметров и рядом «неудобных» даже в постановочном: аспекте ограничений.

Пусть для каждой j-й задаче из определенных J зон известны расстояния L_j от опорного пункта до границ зоны, определены вероятные размеры (площадь S_j) нефтяного пятна и заданы вероятности Q_j возникновения аварии в j-й зоне. Будем далее решение задачи ликвидации аварийных, разливов нефтепродуктов в конкретной зоне считать самостоятельной j-й задачей, т.е. всего в рассмотрении должно участвовать J задач.

Предполагаем далее, что известен общий состав и номенклатура имеющихся средств (нефтесборщиков, буксиров, теплоходов) и тактико-технические характеристики каждого из них. Пусть всего имеется в распоряжении лица, принимающего решение, *I* классов теплоходов.

Составим матрицу «задачи – средства» (таблица 1).

В каждой – ячейке матрицы «задачи – средства», размещено в количество нефтесборщиков *i*-го класса участвующее в выполнении *j*-й задачи. Таким образом, каждая строка матрицы содержит вектор n_j:

$$n_i = \left(n_{i1}, n_{i2} ..., n_{ij}, ..., n_{iJ}\right),$$
$$i = 1,2,...., I;\ j = 1,2,...J \tag{1}$$

характеризующее распределение, конкретного, *i*-го класса, нефтесборщиков между задачами.

Таблица 1

Матрица «задачи-средства»

j / i	1	…	j	…	J	
1	n_{11}	…	n_{1j}	…	n_{1J}	
i	n_{i1}	…	n_{ij}	…	n_{iJ}	n_i
I	n_{I1}	…	n_{Ij}	…	n_{ij}	
			n_j			

Каждый столбец матрицы «задачи-средства» содержит вектор n_j:

$$n_j = \left(n_{1j}, n_{2j} ..., n_{ij}, ..., n_{Ij}\right), \tag{2}$$

характеризующую номенклатуру средств, используемую при решении конкретной *j*-й задачи. Каждая координата вектора n_{ij} соответствует количеству нефтесборщиков *i*-го-класса, участвующих при решении *j*-й задачи, т.е. размещаемой опорном пункте конкретной зоны ответственности на акватории Северного Каспия.

Для выбора оптимального распределения средств между задачами необходимо выбрать критерий распределить некоторые допущения:

Во-первых, будем полагать, что обязательно должно быть решены все задачи, т.е. ни один опорный пункт, не может не содержать хотя бы одно средство ликвидации, аварийных, разливов нефтепродуктов. При ограниченной номенклатуре рассматриваемых средств это условие может быть, выполнено, только при снятии ограничения (2) на время выполнения задачи, и выделенный, наряд сил должен работать «на пятне» столько времени, сколько ему понадобится для ликвидации разлива.

Во-вторых, приоритетной, будем полагать, наиболее трудоемкую задачу ликвидации разлива нефтепродукта, выполнение которой потребует наибольших средств.

В-третьих, выполнение, задачи ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов, в конкретной зоне ответственности выполняется только силами, дислоцированными в соответствующем опорном пункте.

Первое допущение может быть формализовано условием:

$$\sum_{i=t}^{J} n_{ij} \geq 1 \qquad (3)$$

для всех j=1,2,..., J

Формализация второго допущения может быть определена при разработке алгоритма выбора оптимальной номенклатуры средств, т.е. оптимального варианта матрицы «задачи-средства».

Третье допущение исключает возможность использования в разных задачах ликвидации разливов нефтепродуктов одного и того же средства, т.е. необходимо в расчетах предусмотреть процедуру исключения из дальнейшего рассмотрения, ранее выбранные средства.

В качестве критерий и задачи поиска оптимального распределения сил между разнородными задачами целесообразно применить функцию стоимости F_{Σ} ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов суммарно по всем зонам ответственности.

Затраты F_j на выполнение j-й задачи будут определяться ее конкретными условиями (площадью S_j пятна, расстоянием L_j до границ зоны и т. д.), и номенклатурой выбранных для ликвидации разлива средств, характеризуемой вектором n_j:

$$F_j = Q_j \cdot F_j(n_j, S_j, L_j, \ldots) \quad (4)$$

$$F_{\sum} = \sum_{j=1}^{J} Q_j \cdot F_j(n_j, S_j, L_j, \ldots) \quad (5)$$

где вектор n_j определен в соответствии с (2).

$$\sum_{i=1}^{I} n_{ij} \geq 1, \quad j = 1,2,\ldots J \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^{J} n_{ij} \prec N_i, \quad i = 1,2,\ldots I \quad (7)$$

$$\sum Q_j = 1 \quad (8)$$

Пусть N представляет собой множество допустимого числа рассматриваемых классов теплоходов, участвующих в решении задач.

В общем виде задача поиска оптимального распределения выделенных, средств между задачами может быть сформулировано следующим образом.

На заданном множестве N необходимо выбрать такие распределения между J задачами I классов и числа теплоходов каждого класса в каждой задаче, которые доставят минимум функции общей стоимости решения F_Σ:

$$F_{\sum}(n_j^*, S_j, L_j, \ldots.) = \sum_{j=1}^{J} Q_j \cdot F_j(n_j^*, S_j, L_j, \ldots.) = \min_{n_j = N}\left(F_{\sum}(n_j, S_j, L_j, \ldots.)\right) \quad (9)$$

при выполнении ограничений (6), (7) и условия (8).

Поставленная задача (9) по существу является правильной, но недостаточно корректно при внимательном рассмотрении сформулированных выше допущений, в частности в постановке (9) не нашло отражения третье допущение о невозможности одновременного размещения одного и того же теплохода в разных пунктах базирования.

Рассмотрим подробнее матрицу «задачи средства» и заметим, что любая j-я задача может быть решена различной номенклатурой рассматриваемых:

средств. Допустим далее, что для решения любой задачи число участников данного *i*-го класса теплоходов ограничено, а общее число средств, участвующих в решении одной задачи не может превышать значения *r*. Тогда при рассмотрении конкретной *j*-й задачи каждый столбец матрицы (1) будет содержать *R* вариантов решений:

$$R = C_1^1 \cdot C_1^2 + ... + C_1^r \tag{10}$$

где C^k_I – число сочетаний из *I* элементов по *k*,

$$C_I^k = \frac{I}{k \cdot (I - k)} \tag{11}$$

Следовательно, в вычислительной процедуре для каждого значения *j* (для каждой задачи) необходимо выполнить число решений, определяемых выражением (10). Например, при рассмотрении 8 классов теплоходов и при условии, что в решении любой задачи число теплоходов каждого класса не должно превосходить двух, получим число дополнительных столбцов для одной задачи:

$$R = C_8^1 + C_8^2 = 8 + 28 = 36$$

Представление модифицированной матрицы «задачи-средства» для одной произвольной задачи представлено в виде таблицы 2.

Таблица 2

Пример модифицированной матрицы «задачи-средства».

j / *i*	…	*j*							…
1	…	0	0	0	1	1	1	0	…
2	…	0	1	2	0	0	1	0	…
3	…	1	0	0	0	1	0	2	…
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
k	…	*k*=1	*k*=2	*k*=3	*k*=4	*k*=5	*k*=6	*k*=7	…
F	…	F_{j1}	F_{j2}	F_{j3}	F_{j4}	F_{j5}	F_{j6}	F_{j7}	…

Если всего рассматривается пять зон ответственности, т.е. пять опорных пунктов базирования теплоходов, то при распределение семи классов нефтесборщиков между этими задачами и при условии, что представительство каждого класса в конкретной задаче не должно превышать двух единиц, необходимо выполнить (RJ) вычислений, т.е. 180 моделирования, обращаясь при каждом из них к решению задача (3.5)–(3.12).

В целях сужения, размерности задачи (9) введем в рассмотрение вспомогательный вектор управления v:

$$v = \left(v_{i1}, v_{i2} ..., v_{ij} ...., v_{IJ}\right) \quad (12)$$

каждая координата, которая может принимать значение 0 или 1: v_{ij}=1, если теплоход i-го класса принимает участие в решении j-и задачи, v_{ij}=0 в противном случае.

Множество N представим следующим образом:

$$N = \left\{n_{ij} : n_{ij} = 1; i \in I; j \in J\right\} \quad (13)$$

Тогда задача (3.35) приобретает следующий вид:

$$F_{\sum}\left(n_j*, S_j, L_j, ...\right) = \sum_{j=1}^{J} Q_j \cdot F_j\left(n_j*, S_j, L_j, ...\right) = \min_{r_i \in F}\left[F_{\Sigma}\left(v_j, S_j, L_j, ...\right)\right] \quad (14)$$

где V – множество различных сочетаний значений координат единичного вектора v_{ji}, v_j – вектор столбец выбранных классов нефтесборщиков для решения j-й задачи:

$$v_j = \begin{vmatrix} v_{1j} \\ v_{2j} \\ ... \\ v_{ij} \end{vmatrix} \quad (15)$$

Оговоренные ранее ограничения принимают следующий вид. Условие включения в рассмотрение каждого класса теплоходов:

$$\sum_{j=1}^{J} v_i \succ 0, \;\; i = 1,2...., I \quad (16)$$

Условие обязательного решения любой из рассматриваемых задач:

$$\sum_{i=1}^{I} v_i \geq 1, \;\; j = 1,2...., J \quad (17)$$

Условие не превышения заданного числа r нефтесборщиков i-го класса при решении любой задачи:

$$\sum_{j=1}^{J} v_i \le r,\ \ i = 1{,}2...., I \tag{18}$$

Условие не превышения заданного общего числа теплоходов в решении задачи:

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} v_{ij}^{*} \le N,\, i = 1{,}2....I,\, j = 1{,}2,...., J \tag{19}$$

Напомним, что каждая координата вектора v_{ij}^{*} в решении (9) может принимать одно из двух значений (0 или 1) и для: каждой j-й задачи число вариантов представления вектора v_{ji} равно R, определяемое выражением (10).

Следовательно, для каждой j-й задачи будет найдено R решений, всего (R-J) решений, в которых для различных j сочетания классов нефтесборщиков (вектор v_j) будут повторяться (для соответствующих k), при этом значения $F_{jk}(v_j, S_j, L_j)$ в общем случае будут различными вследствие расхождения в значениях параметров S_j, L_j и т. д. Поиск оптимального распределения средств ликвидации последствий аварийных разливов нефтепродуктов производится с помощью следующего алгоритма учитывающего сформулированные выше второе и третье допущения.

Алгоритм ОК

1. Определяются всевозможные сочетания вектора v_{ij} для любой из рассматриваемых задач, т.е. векторы v_i, v_j. с учетом ограничений (16)–(19).

2. Для каждого k-го варианта набора классов теплоходов v_j вычисляется помощью решения (3.5)–(3.12) значение функции стоимости $Q_jF_{jk}(v_j, S_j, L_j)$. Решения j-й задачи производятся для всех: $k \in R$.

3. Выполняется пункт 2 для: всех $j \in J$,

4. Определяется номенклатура наиболее «тяжелой» задачи по принципу максимина:

$$v_j^{*}(1) = \max_{j \in J} \min_{k \in R} Q_j \cdot F_{jk}\left(v_j, S_j, L_j, ...\right) \tag{20}$$

Допустим, что в результате решения (20) определена задача $j(1)$, и индекс $k(1)$.

5. Исключается из дальнейшего рассмотрения: задача $j(1)$, номенклатура средств, соответствующая индексу $k(1)$ или, что равнозначно, исключается вектор, а также векторы v_{ji} координаты, которых сознали с соответствующими координатами векторов, т.е. мощности множеств J, V, сократились на единицу, а размерность модифицированной матрицы «задачи-средства» сократилась на J столбцов и одну или две строки в зависимости от размерности вектора v_i. Общее число столбцов матрицы (таблица 2) стало равным $[(R\text{-}1)–(J\text{-}1)]$, при этом для каждой задачи (каждого из оставшихся j) число столбцов сократилось на единицу.

6. Вновь решаем задачу (20), но на ограниченных по мощности множествах;

$$v_j^*(2) = \max_{j \in J(1)} \min_{k \in R(1)} Q_j \cdot F_{jk}\left(v_j, S_j, L_j, \ldots\right) \tag{21}$$

7. Возвращаемся к шагу 5, если множество J содержит более одного элемента. В противном случае решается задача:

$$v_j^*(n) = \min_{k \in R(n)} Q_j \cdot F_{jk}\left(v_j, S_j, L_j, \ldots\right) \tag{22}$$

где n – число выполненных шагов, равному числу рассматриваемых задач, т.е. значению J.

В результате выполнения алгоритма ОК будут найдены:

– оптимальные векторы для каждой j-й задачи, что с учетом (3.39)–(3.42) равнозначно номенклатуре нефтесборщиков n_j*;

– соответствующие значения стоимости выполнения работ по ликвидации последствий аварийного разлива нефтепродуктов $F^*_j(n^*_j, S_j, L_i)$ и их математические ожидания.

Замечание. Решение задачи (4)–(7) с применением предложенного алгоритма возможно только в случае выделения количества средств в объеме, достаточном для размещения в каждом опорном пункте хотя бы одного средства: $N \geq J$.

Итоговое ожидаемое значение стоимости выполнения всех J задач при равномерном распределении аварий по зонам ответственности соответствующей номенклатуры определится суммой:

$$F_{\Sigma} = \sum_{j=1}^{J} Q_j \cdot F_j^{*}\left(n_{j,} S_j, L_j, ...\right) \tag{23}$$

где Q_j – вероятность возникновения аварийной ситуации в j-й зоне.

Если вероятности Q_j неизвестны, что часто бывают в реальных условиях, то можно использовать субъективный подход, методов теорий нечетких множеств задаваясь конкретными значениями Q_j, исходя из опыта организации ликвидации разливов нефтепродуктов.

В том случае, если статистики по распределению аварий между зонами недостаточно, могут применяться различные технические приемы [1]. Так, если нельзя отдать предпочтения ни одной гипотезе, то естественно назначить значения вероятности их реализации равными между собой (так называемый принцип Лапласа):

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = ...Q_j....Q_J = \frac{1}{J} \tag{24}$$

При этом должно выполняться условие, что рассматриваемые случайные возникновения аварий образуют полную группу событий:

$$\sum_{j=1}^{J} Q_j = 1 \tag{25}$$

Другой, часто, встречаемый подход состоит в использовании некоторого приоритета, событий. Например, можно предположить, что наиболее «тяжелые» или наиболее «дорогие» по стоимости ликвидации последствий аварии встречаются реже остальных, и вероятность возникновения конкретной аварии возрастает по мере снижения ожидаемой стоимости (сложности, масштабов загрязнения) ее ликвидации.

Упорядочим значения F_j^* в порядке их убывания. Пусть соответствующие индексы будут равны: h_1, h_2,…, h_i. Напомним, что общее число таких значений h_j

равно числу шагов алгоритма ОК, т.е. равно n. Тогда соответствующие вероятности можно назначить пропорционально членам убывающей арифметической прогрессии:

$$Q_{h1} : Q_{h2} : \dots : Q_{hi} = n : (n-1) : \dots : 1 \tag{26}$$

Или, учитывай (25) получим:

$$Q_{hj} = \frac{2 \cdot (n - h_j \div 1)}{n \cdot (n+1)} \tag{27}$$

Таким образом, решение задачи оптимального размещения сил заданной номенклатуры между определенными, опорными пунктами на акватории Северного Каспия базируется на выполнении алгоритма ОК.

Список литературы

1. Карабалин У.С. Методы ликвидации и предупреждения аварийных ситуаций при освоении месторождений углеводородного сырья. – Атырау: Ер-Тостик, 2008. – 185 с.

2. Оразбаев Б.Б. Моделирование и оптимизация экономико-экологических систем (на примере объектов нефтегазовой отрасли) / Б.Б. Оразбаев, Ф.Т. Сериков. – Алматы: Ғылым, 2002. – 140 с.

3. Оразбаева К.Н. Математическое моделирование производственных объектов нефтегазовой отрасли / К.Н. Оразбаева, Ф.Т. Сериков, Б.Б. Оразбаев. – Алматы: Эверо, 2005. – 170 с.