ОПТИМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНВЕСТИЦИЙ И МЕТОДОВ УВЕЛИЧЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ ПЛАСТОВ ПО ОБЪЕКТАМ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

М.Т.Абасов, У.О.Ахмедов, В.М.Валиев, С.И.Гулиев, К.С.Мамедов

Институт геологии НАН Азербайджана
AZ 1143, Баку, просп. Г.Джавида, 29А

Предложена экономико-математическая модель определения оптимального назначения методов увеличения нефтеотдачи пластов по объектам и распределения объема инвестиций между ними для группы нефтяных месторождений, позволяющая определять возможный прирост промышленных запасов нефти в зависимости от объемов инвестиций.

Введение

Длительно разрабатываемые нефтяные залежи в основном охватывают все месторождения суши Республики Азербайджан, которые распределены на большой площади. Несмотря на более чем вековой период их развития, потенциал этих месторождений является еще довольно привлекательным. Однако их разработка сопровождается рядом геолого–технических и финансово–экономических трудностей; некоторые из них приведены ниже:

- Основные месторождения эксплуатируемого фонда, составляющие основу ресурсной базы суши Республики, в значительной степени выработаны.
- Высокая обводненность добываемой продукции привела к увеличению доли низкопродуктивных и трудноизвлекаемых запасов (ТИЗ).
- Среднегодовой дебит новых скважин, разбуриваемых на длительно разрабатываемых месторождениях суши, уменьшился; следовательно, возросли финансовые и материально-технические затраты на создание 1 т/год новой мощности.
- Сокращение финансирования геологоразведочных работ привело к нехватке высокопроизводительной техники и оборудования для добычи и бурения.
- Не обеспечено самофинансирование нефтедобывающих предприятий из-за низких внутренних цен на нефть.
- Основная часть технических средств сильно изношена, что в свою очередь требует значительно больших финансовых затрат и материально-технических ресурсов на их разработку.

Анализ финансового состояния нефтегазового комплекса (НГК) Азербайджана показывает, что разработка месторождений суши сопровождается нехваткой инвестиций для приобретения новой техники и технологий, что в свою очередь приводит к увеличению эксплуатационных затрат и соответственно к повышению себестоимости нефти. Так, например, в НГДУ 28 Мая себестоимость 1 т добычи нефти составляет около 100 тыс. манат, что в 9 раз меньше, чем в НГДУ им. Тагиева.

Для обеспечения рентабельной эксплуатации ТИЗ и находящихся в разработке месторождений необходимо создание новых методов и подходов с применением новых методов увеличения нефтеотдачи (МУН) и технологий и умение реагировать на изменения горно-геологических условий в процессе эксплуатации таких месторождений, а также на изменения внешних экономических условий производства, обеспечивающих привлечение масштабных инвестиций (Абасов и др., 1995). Но уже к настоящему времени потенциально наиболее продуктивные месторождения доосваиваются на основе соглашения о разделе продукций (СРП) и совместными предприятиями, а в дальнейшем ожидается и привлечение инвестиций для разработки других месторождений суши Республики. Очевидно, что применение новых МУН пласта с использованием новых технологий нефтедобычи является одним из направлений увеличения извлечения нефти месторождений суши Азербайджана.

Дальнейшее развитие нефтедобывающей промышленности главным образом связано с поиском новых нефтяных месторождений и созданием условий для максимально возможного извлечения нефти как из находящихся в эксплуатации месторождений, так и новых. Это создает условия для прироста промышленных запасов нефти.

В связи с этим приводится разработанная экономико-математическая модель оптимального распределения инвестиций и МУН пластов по объектам нефтяных месторождений.

Математическая постановка задачи

Пусть имеется m объектов и n используемых МУН пластов на этих объектах. Применение j-го метода к i-му объекту характеризуется:

- выделением некоторого капитала x_{ij} на применение метода,
- получением прибыли $f_{ij}(x_{ij})$ от применения метода.

Для простоты изложения предполагается, что к каждому объекту может быть применен только один из возможных МУН.

Для математической формализации задачи введем переменные:

$$s_{ij} = \begin{cases} 1, \text{если } j-\text{ый метод применяется к } i-\text{ому объекту} \\ 0, \text{в противном случае} \end{cases} \quad (1)$$

Задача заключается в нахождении такого распределения (назначения) МУН между объектами и такого распределения x_{ij} имеющегося заданного капитала R на применение этих методов, чтобы суммарная прибыль, полученная от этих распределений, была максимальной.

Если матрица $S = \| S_{ij} \|;\ i = \overline{1,m},\ j = \overline{1,n}$, является матрицей некоторого распределения (назначения) методов, то суммарная прибыль от такого назначения будет $\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} s_{ij} f_{ij}(x_{ij})$ и должна быть максимизирована по переменным x_{ij}. Далее из всех возможных назначений методов по объектам необходимо выбрать то назначение, которое соответствует максимальному из величин $\max\limits_{x_{ij}} \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} s_{ij} f_{ij}(x_{ij})$. При этом во всех возможных назначениях суммарный распределенный между объектами капитал ограничен некоторой величиной R. Таким образом, получаем следующую задачу:

$$G = \max_{S} \begin{Bmatrix} \max\limits_{x_{ij}} \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} s_{ij} f_{ij}(x_{ij}) & (2) \\ \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} s_{ij} x_{ij} \le R & (3) \\ \sum_{j=1}^{n} s_{ij} = 1;\ i = \overline{1,m} & (4) \\ x_{ij} \ge 0;\ i = \overline{1,m};\ j = \overline{1,n} & (5) \end{Bmatrix}.$$

Здесь через G обозначена искомая, т.е. максимальная, суммарная величина прибыли. Условие (4) означает, что к каждому объекту применяется только один метод. Кроме того, естественно предположить, что выделенные капиталы неотрицательны (условие (5)).

Метод решения задачи

Рассматриваемая задача является комбинацией двух известных классических оптимизационных задач: задачи оптимального распределения капитала и задачи о назначениях. Её сложность заключается в том, что если подходить к ней как к задаче оптимального распределения ресурсов (капитала), то для ее успешного решения необходимо знание оптимального назначения методов между объектами. С другой стороны, если рассматривать данную задачу как задачу об оптимальном назначении методов и применить к ее решению известные методы [Венгерский метод (Кристофидес, 1978), метод ветвей и границ (Романовский, 1977) и т.п.], то должны быть известны оптимальные распределения капитала по каждому назначению.

Специальный прием, предложенный К.С. Мамедовым и названный процедурой «свертывания», учитывая особенности задачи, существенно упрощает расчеты.

Применение того или иного МУН к объекту зависит от характеристики этого объекта:

1. Известно, что каждый объект характеризуется набором параметров, т.е. исходными физико-геологическими данными (Абасов, Багиров, 1983; Ибрагимов и др., 1991; Сургучев, 1985 и др.). Обозначим эти параметры через $P_t, t=\overline{1,r}$, например: P_1 – вязкость нефти; P_2 – глубина залегания пластов; P_3 – проницаемость пород коллекторов; P_4 – степень использования запасов и т.д.
2. Каждый параметр P_k характеризуется набором (множеством) условий $U_k = \{U_{k_1}, U_{k_2} ..., U_{k_{l_k}}\}$, например, условие U_{k_1} может означать $C_{k_1} \le P_k \le d_{k_1}$, условие U_{k_2} может означать $C_{k_2} \le P_k \le d_{k_2}$, где величины $C_{k_1}, C_{k_2}, d_{k_1}, d_{k_2}$ являются постоянными с соответствующими единицами измерения и т.д.

Пусть $U = U_1 \times U_2 \times ... \times U_r$ - декартово произведение, тогда каждый i - ый объект можно характеризовать единым набором условий $\{U_{1l_1}^{(i)}, U_{2l_2}^{(i)}, ..., U_{rl_r}^{(i)}\}$. Этот набор условий определяет множество методов

$$M_i = \{j_{1i}, j_{2i}, ..., j_{ti}\}, i = \overline{1,m},$$

которые могут быть применены к i - му объекту.

Согласно принципу построения матрицы S:

$$j \notin M_i \Leftrightarrow s_{ij} = 0, i = \overline{1,m}.$$

После введения множества M_i условия (2)-(4) примут вид:

$$G = \max_S \begin{cases} \max\limits_{x_{ij}} \sum\limits_{i=1}^{m} \sum\limits_{j \in M_i} s_{ij} f_{ij}(x_{ij}) & (6) \\ \sum\limits_{i=1}^{m} \sum\limits_{j \in M_i} s_{ij} x_{ij} \le R & (7) \\ \sum\limits_{j \in M_i} s_{ij} = 1;\ i = \overline{1,m} & (8) \\ x_{ij} \ge 0;\ i = \overline{1,m};\ j = \overline{1,n} & (9) \end{cases}.$$

Обозначим через n_i число методов, которые могут быть применены к i - му объекту.

$$n_i = \dim(M_i) \quad i = \overline{1,m}.$$

Как видно из (6)-(9), при прямом подходе к решению данной задачи имеется $N = n_1 \cdot n_2 \cdot ... \cdot n_m$ различных вариантов назначений методов, и каждому конкретному назначению соответствует задача распределения капитала между объектами (на применение методов по этому конкретному назначению). Здесь n_i - число элементов множества M_i и $1 \le n_i \le n$.

Процедура «свертывания» всех этих задач в одну задачу распределения заданного капитала R представляет собой многошаговый процесс. На первом шаге исходные N задач распределения капитала сводятся в $N_1 = n_2 \cdot \ldots \cdot n_m$ задачи таким образом, что определяется способ назначения методов из множества M_1 к первому объекту в зависимости от выделенного для этого объекта объема капитала. Для описания этого процесса обозначим декартовое произведение множеств M_i через M : $M = M_1 \times M_2 \times \ldots \times M_m$. Пусть $(j_1, j_2, \ldots, j_m)$ такие наборы из M, что номера (индексы) $j_2 \in M_2, \ldots, j_m \in M_m$ фиксированы, а j_1 принимает все значения из M_1. Этим наборам соответствуют n_1 задачи распределения следующего вида:

$$G_1 = \max_{x_{ij_i}} \left(\begin{array}{l} \sum_{i=1}^{m} f_{ij_i}(x_{ij_i}) \\ \sum_{i=1}^{m} x_{ij_i} \le R, \\ x_{ij_i} \ge 0 \end{array} \right)_{j_1 \in M_1},$$

которые могут быть записаны в виде

$$G_1 = \max_{0 \le x_{1j_1} \le R} \{ f_{1j_1}(x_{ij_1}) + \max_{0 \le x_{2j_2} + \ldots x_{mj_m} \le R - x_{ij_1}} \sum_{i=2}^{m} f_{ij_i}(x_{ij_i}) \}_{j_1 \in M_1} \qquad (10)$$

В каждой из этих задач при изменении x_{1j_1} на отрезке $[0, R]$ вторые слагаемые в фигурных скобках (10) равны между собой для всех $j_1 \in M_1$. Отсюда и из известных свойств операции взятия максимума имеем:

$$G_1 = \max_{0 \le y_1 \le R} \left\{ \max_{j_1 \in M_1} f_{1j_1}(y_1) + \max_{0 \le x_{2j_2} + \ldots + x_{mj_m} \le R - y_1} \sum_{i=2}^{m} f_{ij_i}(x_{ij_i}) \right\}, \qquad (11)$$

где y_1 - новая переменная, заменяющая все переменные x_{1j_1}, $j_1 \in M_1$ в операции max.

Введем обозначение:

$$F_1(y_1) = \max_{j_1 \in M_1} \{ f_{1j_1}(y_1) \}. \qquad (12)$$

Тогда (11) запишется в виде:

$$G_1 = \max_{0 \le y_1 \le R} \left\{ F_1(y_1) + \max_{0 \le x_{2j_2} + \ldots x_{mj_m} \le R - y_1} \sum_{i=2}^{m} f_{ij_i}(x_{ij_i}) \right\}. \qquad (13)$$

Поскольку индексы $j_2, \ldots, j_m$ фиксированы, (13) состоит только из одной задачи.

Таким образом, группа задач распределения капитала, состоящая из n_1 задач, сведена к одной задаче (13). Заметим, что равенство (11) определяет способ назначения МУН: к первому объекту назначается метод, который дает наибольшую прибыль от выделенного капитала y_1 при оптимальном распределении всего капитала R между объектами.

Действуя аналогично, мы можем свертывать все группы задач, соответствующие различным наборам индексов $(j_1, j_2, \ldots, j_m)$, в которых индексы $j_2, j_3, \ldots, j_m$ фиксированы, а j_1 изменяется во множестве M_1. В результате этих свертываний исходная задача сводится к N_1 задачам вида (13).

На втором шаге свертывания рассматривается задача вида:

$$\max_{0 \le x_{2j_2} + \ldots x_{mj_m} \le R - y_1} \sum_{i=2}^{m} f_{ij_i}(x_{ij_i})$$

при всевозможных изменениях индексов $(j_2, j_3, \ldots, j_m)$. Теперь, проделав все действия первого шага процедуры свертывания для индекса j_2, получаем

$$\max_{0 \le x_{2j_2} + \ldots x_{mj_m} \le R - y_1} \sum_{i=2}^{m} f_{ij_i}(x_{ij_i}) = \max_{0 \le y_2 \le R} \left\{ F_2(y_2) + \max_{0 \le x_{3j_3} + \ldots x_{mj_m} \le R - y_1 - y_2} \sum_{i=3}^{m} f_{ij_i}(x_{ij_i}) \right\}$$

для всех фиксированных индексов

$j_3, j_4, \ldots, j_m$, где $F_2(y_2) = \max_{j_2 \in M_2} \{ f_{2j_2}(y_2) \}$.

Продолжая таким образом до конечного m-го шага, получаем:

$$G = \max_{0 \le y_1 \le R} \left\{ F_1(y_1) + \max_{0 \le y_2 \le R - y_1} \{ F_2(y_2) + \ldots + \max_{0 \le y_m \le R - \sum_{i=1}^{m-1} y_i} F_m(y_m) \} \ldots \} \right\}. \qquad (14)$$

Правая часть равенства (14) является развертыванием метода динамического программирования для классической задачи распределения заданного капитала R:

$$\sum_{i=1}^{m} F_i(y_i) \to \max \qquad (15)$$

$$\sum_{i=1}^{m} y_i \le R \qquad (16)$$

$$y_i \ge 0,\ i = \overline{1,m}, \qquad (17)$$

здесь

$$F_i(y_i) = \max_{j_i \in M_i}\{f_{ij_i}(y_i)\},\ i = \overline{1,m}, \qquad (18)$$

а y_i - новые переменные, заменяющие x_{ij_i}, $j_i \in M_i$ в операции взятия максимума.

Задача (15)-(17) решается методом динамического программирования с вычислением значений функции $F_i(y_i)$, что, по существу, является решением исходной задачи (2)-(5).

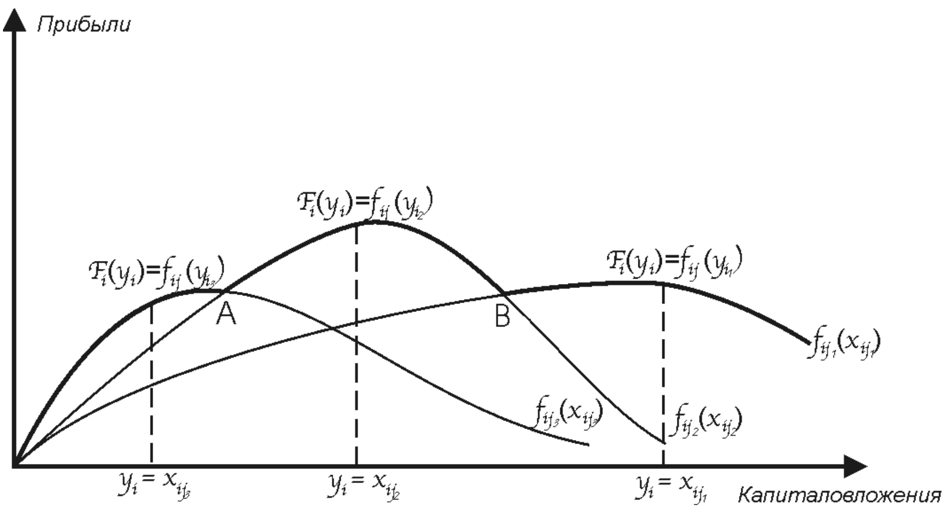
Естественно, что после решения задачи (15)-(17) производится переход к первоначальным переменным x_{ij}, принимая во внимания переменные y_i.

При переходе от задачи (2)-(5) к задаче (15)–(17) использовано то обстоятельство, что если в (18) $F_i(y_i) = f_{i_0 j_0}(y_i)$, то значение переменной $x_{i_0 j_0}$ обозначается через y_i, и в дальнейшем все ограничения, относящиеся к $x_{i_0 j_0}$, будут относиться к переменной y_i.

Смысл введенных функций $F_i(y_i)$, $i = \overline{1,m}$ становится более отчетливым, если воспользоваться их графическими представлениями. Для наглядности предположим, что к какому-либо объекту могут быть применены 3 метода: j_1, j_2, j_3. На рисунке графики функций $f_{ij_1}(x_{ij_1}), f_{ij_2}(x_{ij_2}), f_{ij_3}(x_{ij_3})$ сведены к одной координатной системе, а жирной линией обозначен график функции $F_i(y_i)$.

Как видно из графика, функция $F_i(y_i)$ может не сохранять некоторые свойства исходных функций f_{ij}. Например:

- если функции f_{ij} выпуклы (на практике в большинстве случаев это имеет место), то $F_i(y_i)$ таковой может и не быть.
- если функции f_{ij} дифференцируемы, то $F_i(y_i)$ в некоторых точках (например, в данном случае в точках A, B) может быть не дифференцируемой (оба эти утверждения могут быть доказаны аналитически).



Графики функций $f_{ij_1}(x_{ij_1}), f_{ij_2}(x_{ij_2}), f_{ij_3}(x_{ij_3})$

Не выполнение этих условий приводит к тому, что применение к решению задачи (15)–(17) методов, использующих свойства дифференцируемости или выпуклости, связано с определенными трудностями. Поэтому целесообразнее решать поставленную задачу таким методом, который не связан со свойствами выпуклости и дифференцируемости. Как известно, одним из таких методов является метод динамического программирования (Беллман, 1962), функциональные уравнения (уравнения Беллмана) которого имеют вид:

$$B_1(z) = \max_{0 \le y_1 \le z} F_{1_i}(y_1) \qquad 0 \le z \le R, \quad (19)$$

а при $2 \le k \le m-1$

$$B_k(z) = \max_{0 \le y_k \le z} \{F_k(y_k) + B_{k-1}(z - y_k)\} \quad . (20)$$

При $k = m$, $G = B_m(R)$, т.е. максимальная суммарная прибыль от назначения S и от оптимального распределения капитала есть G, который равен значению функции Беллмана $B_m(R)$.

Переход от переменных y_i к переменным x_{ij} очевиден: при каждом значении y_i из условия (18) находится соответствующие x_{ij}, определяемые индексами функции $f_{ij}(y_i)$, удовлетворяющей (18).

При «прямом ходе» вычислений по формулам (19)-(20) вместе с условно–оптимальными значениями $\overline{y_i}$ фиксируются и соответствующие значения $\overline{x_{ij}}$, которые будут использованы при «обратном ходе».

Вычислительные трудности описанного метода, связанные с запоминанием (табулированием) значений функций B_k, не создают существенных проблем для современных ЭВМ, как это имело место в прежние годы, когда объём памяти и быстродействие ЭВМ были сильно ограничены.

Необходимо отметить, что условие (4) в рассматриваемой задаче на практике не всегда соблюдается, т.е. возможны случаи, когда к одному объекту могут быть применены одновременно несколько МУН. Как правило, число таких методов не велико и ограничивается двумя, тремя.

Пусть, например, к i-му объекту могут применяться методы j_1, j_2, j_3, j_4 и первые два из них одновременно. Тогда методы j_1 и j_2 можно объединить и рассматривать как один комплексный метод, а функцию прибыли $F_i(y_i)$ определить как:

$$F_i(y_i) = \max\{f_{ij_1}(y_i) + f_{ij_2}(y_i), f_{ij_3}(y_i), f_{ij_4}(y_i)\}. \quad (21)$$

При переходе от переменных y_i^* к переменным x_{ij}, если $F_i(y_i) = f_{ij_1}(y_i) + f_{ij_2}(y_i)$, то значению y_i^* будет соответствовать значение $x_{ij_1}^* + x_{ij_2}^*$. В этом случае, чтобы найти окончательное распределение капитала между методами j_1 и j_2, решается задача:

$$\begin{gathered} f_{ij_1}(x_{ij_1}) + f_{ij_2}(x_{ij_2}) \to \max \\ x_{ij_1} + x_{ij_2} = y_i^* \\ x_{ij_1}, x_{ij_2} \ge 0 \end{gathered} \qquad (22)$$

Как видно, задача (22) является стандартной задачей распределения ресурсов и в свою очередь может быть решена методом динамического программирования или каким-нибудь другим методом.

Таким образом, в случае, когда к объектам одновременно могут быть применены несколько методов, возможно (но не обязательно) возникновение «вторичной» задачи распределения ресурсов типа (22). В таких случаях (15)-(17) естественно называть задачей первого уровня, а (22) – задачей второго уровня. Заметим, что с увеличением числа МУН, применяемых одновременно к объектам, возможно возрастание размерности задач второго уровня. Однако такое возрастание не грозит «катастрофическим» осложнением вычислительных процессов, т.к., во–первых, увеличение размерности задач второго уровня приводит к уменьшению задач первого уровня, во–вторых, поскольку задачи первого и второго уровней однотипные, при решении задач на ЭВМ одна и та же процедура (или модуль) способна решать обе задачи.

В конце заметим, что в зависимости от характера объекта и применяемого метода время завершения разработки отдельных объектов может различаться. В предлагаемой модели предполагается, что временной интервал охватывает весь процесс разработки отдельных объектов.

Выводы

Таким образом, в работе предложена экономико-математическая модель определения оптимального назначения МУН по объектам и распределения объема инвестиций между ними для различных нефтяных месторождений суши Азербайджана с целью получения максимальной прибыли, с помощью которой определяется возможный прирост промышленных запасов нефти в зависимости от объемов инвестиций.

Необходимо отметить, что предложенная методика решения задачи носит концептуальный характер и позволяет решать различные задачи такого плана.

Для решения сформулированных оптимизационных задач составлена компьютерная программа в системе Делфи и решены тестовые задачи.

ЛИТЕРАТУРА

АБАСОВ, М.Т., .БАГИРОВ, Б.А. 1983. Исследование структуры запасов с целью перспективного планирования методов повышения нефтеотдачи. *АНХ*, 1, 1-4.

АБАСОВ, М.Т., КУЛИЕВ, А.М., АЛИЕВ, А.А., НАБИЕВ, К.М. 1995. Задача оптимального распределения объемов бурения по группе длительно разрабатываемых месторождений. *Известия АН Азербайджана,* 1-3, 90-95.

БЕЛЛМАН, Р. 1962. Динамическое программирование. Мир, Москва.

ИБРАГИМОВ, Г.З.. ФАЗЛУТДИНОВ, К.С, ХИСАМУТДИНОВ, Н.И. 1991. Применение химических реагентов для интенсификации добычи нефти. Недра, Москва.

КРИСТОФИДЕС, А. 1978. Теория графов. Алгоритмический подход. Мир, Москва.

РОМАНОВСКИЙ, И. В. 1977. Алгоритмы и решения экстремальных задач. Наука, Москва.

СУРГУЧЕВ, М.Л. 1985. Вторичные и третичные методы увеличения нефтеотдачи пластов. Недра, Москва.