ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОПОЛНЕНИЯ ФОНДОВ УГЛЕВОДОРОДОВ

Михаил Стернин, Геннадий Шепелев

Abstract: *Development of rational strategies of supplementing reserves in a system of oil funds is an actual problem. A model that may assist to oil experts elaborate such strategy for system of oil fields, which are on different stages of exploration, is proposed. The model is a dynamical model of material balance with one-side cross flow from poorly studied funds to more studied ones accompanied by losses as described by transition coefficients given by experts with uncertainty. In the framework of the model is supposed that for each year of planning period levels of oil production (production program) are exogenous variables. Number of unknown variables (that are values of supplements in each fond for each year) in linear equations of the model is equal to production of quantity of time steps in planning period and number of fund types. Number of equations is much less than number of unknown variables. To solve the model it is complemented by criterion of optimality. The criterion is minimum of discounted costs needed for transitions. Coefficients in equations are interval expert estimations. It's rather hard to analyze the problem by Monte-Carlo method because this way requires large-scale calculations for each time step from planning period. One is showed that simpler equivalent model may be developed that permit to calculate needed probability distributions more easily. Besides the model has property of scaling invariance that permits to extend these distributions on further time steps.*

Keywords*: model of supplementing oil funds, expert analysis, property of scaling*

ACM Classification Keywords*: I.6.5 Model Development. I.6.6 Simulation Output Analysis. I.2.8 Plan Execution, Formation and Generation.*

Введение

Несмотря на технологические достижения последних лет, современная экономика по-прежнему остается экономикой, основанной на использовании нефти и газа. В то же время многие разрабатываемые большие нефтяные месторождения находятся на стадии истощения, а новые поля не столь продуктивны, как прежние.

Процессы подготовки новых нефтяных месторождений к эксплуатации достаточно время и капиталоемкие, они требуют глубокого предварительного анализа, выбора и геолого-экономического обоснования стратегии перевода менее изученных полей в более изученные объекты, доступные для рациональной добычи.

Один из инструментов упомянутого геолого-экономического анализа – моделирование процессов пополнения фондов нефти, находящихся на различных стадиях изученности. Результаты моделирования могут помочь экспертам различного уровня прогнозировать ожидаемые объемы дефицита нефти из хорошо разведанных полей и возможные моменты его возникновения, а также оценить ожидаемые объемы работ и требуемые капиталовложения, необходимые для пополнения фондов и обеспечивающие выполнение планируемой программы добычи. Основные показатели таких планов содержатся, например, в энергетической программе России, где имеются ориентировочные цифры годовой добычи на 20-ти летнюю перспективу, а также в стратегических планах крупнейших нефтяных компаний.

Проблемная ситуация для целей моделирования выглядит следующим образом. Задана совокупность нефтяных полей. Все они имеют примерно одинаковые жизненные циклы. В сильно агрегированном виде в рамках одного нефтяного поля картина выглядит следующим образом. Имеются нефтеносные участки, находящиеся на ранних стадиях геологической изученности (они содержат ресурсы категории *D*, или фонды F_D); участки, находящиеся на промежуточных стадиях изученности (с резервами и ресурсами категории C, или фонды F_C); и, наконец, хорошо изученные территории с запасами нефти промышленных категорий (фонды F_A). На самом деле структура фондов гораздо более детальная, чем здесь представленная. Однако, для целей моделирования указанного агрегирования вполне достаточно.

В процессе геологических исследований часть запасов слабо изученных фондов переходит в запасы более изученных фондов, как правило, с некоторыми потерями объемов запасов по сравнению с их оценкой в менее «зрелых» фондах. Эти потери описываются коэффициентами перевода K_{ji}. Для каждой пары непосредственно соседствующих фондов $F_i \rightarrow F_j$ задается свой коэффициент перевода. Коэффициент перевода для фондов промышленных категорий K_A - это коэффициент извлечения нефти (КИН). Он показывает, какую долю нефти, находящейся под земной поверхностью на разрабатываемых участках поля, целесообразно поднять на поверхность при имеющихся технологических, геологических и экономических условиях.

Значения коэффициентов перевода в известной мере зависят от времени, поскольку определяются знаниями о различных участках поля. Однако в реальности их считают постоянными, фиксированными на момент прогнозирования. Значения коэффициентов перевода известны, как правило, как экспертные оценки, иногда точечные, иногда интервальные. Можно видеть, что фонды образуют взаимосвязанную систему фондов.

Описанную проблемную ситуацию можно представить на следующей схеме (рис. 1).

$$F_D \xrightarrow{K_{CD}} F_C \xrightarrow{K_{AC}} F_A \xrightarrow{K_A} \text{ДОБЫТАЯ НЕФТЬ}$$

Рис. 1. Укрупненная структура системы нефтяных фондов различной изученности

Отправляясь от описанной проблемной ситуации, нами с привлечением экспертов, геологов и нефтяников-технологов, разработана следующая модель пополнения фондов нефти, обеспечивающего выполнение заданной производственной программы [Стернин и др., 2007].

Модель пополнения системы взаимосвязанных фондов нефти, находящихся на различных стадиях изученности (детерминированная постановка)

Итак, имеются фонды нефти F_A, F_C, F_D разной степени изученности, для которых известны оценки содержащихся в них запасов соответствующих категорий на момент начала прогнозирования $F_A(0)$, $F_C(0)$, $F_D(0)$. Экзогенно заданы горизонт прогнозирования T и программа добычи нефти с разбивкой по годам $Q(t)$, t = 1, 2,…, T. Обычно рассматриваемый горизонт прогнозирования составляет 15 – 20 лет. Считаются известными также желаемые в соответствии со стратегическими целями объемы фондов на конец периода прогнозирования $F_A(T)$, $F_C(T)$, $F_D(T)$, а также коэффициенты перевода K_{ji} из фонда в фонд. Тогда простейшая модель динамики пополнения фондов может быть представлена как следующая модель материального баланса (1 – 3) с перетоками между фондами:

$$F_A(t) = F_A(t-1) + F_A^+(t) - \frac{Q(t)}{K_A(t)} \tag{1}$$

$$F_C(t) = F_C(t-1) + F_C^+(t) - \frac{F_A^+(t)}{K_{AC}(t)} \tag{2}$$

$$F_D(t) = F_D(t-1) + F_D^+(t) - \frac{F_C^+(t)}{K_{CD}(t)} \tag{3}$$

Искомые величины в модели суть $F_A^+(t)$, $F_C^+(t)$, $F_D^+(t)$. В модель вводятся также ограничения на возможные объемы пополнения каждого i–го фонда ($i \in I = \{F_A, F_C, F_D\}$), такие что $F_{Li}^+(t), \leq F_i^+(t) \leq F_{Hi}^+(t)$. Эти ограничения обусловлены производственными и финансовыми возможностями при освоении фондов. Рекомендованные экспертами значения коэффициентов перевода приведены в таблице 1, а K_A = КИН = =0.3.

Таблица 1. Значения коэффициентов перевода

Тип фонда	Коэффициенты перевода
F_A	**K_A (КИН): 0.35**
F_C	**K_{AC} (F_C => F_A): 0.75**
F_D	**K_{CD} (F_D => F_C): 0.56**

Так как число неизвестных в модели больше числа уравнений, для нахождения искомых величин может быть использован оптимизационный подход с критерием оптимальности, выбранным, например, как минимум приведенных (дисконтированных) затрат на работы по пополнению системы фондов, обеспечивающие выполнение производственной программы $Q(t)$. Важен также вопрос выбора стратегии пополнения. Она зависит от целей планирующего органа и исходного состояния фондов. Вероятно, наилучшей с геологической точки зрения, но достаточно дорогостоящей, представляется стратегия, при которой текущие объемы пополнения, пересчитанные на запасы нефти, должны быть не меньше, чем объемы добычи за тот же период. В реальной модели по решению экспертов использовалась стратегия, согласно которой текущие объемы фондов с учетом пополнения должны быть не менее чем их конечные объемы: $F_i(t) \geq F_i(T)$.

В рамках этой детерминистской модели неопределенность может быть учтена вариацией значений коэффициентов перевода. Это, однако, паллиативный подход. Для более глубокого анализа неопределенности будут использованы другие средства. Но прежде отметим, что для экспресс-анализа текущего потенциала системы фондов эксперты могут использовать агрегированные оценки, являющиеся следствием уравнений материального баланса. Модели, построенные на базе этих уравнений, назовем «экспресс-моделями».

Пусть пополнение фондов D не производится. Количество нефти, которую можно добыть из фондов промышленных категорий F_A за период T (с учетом необходимости иметь объемы $F_A(T)$ в конечном состоянии), равно $Q_A(0) = K_A[F_A(0) - F_A(T)]$, $(F_A(0) \geq F_A(T))$. Совместные возможности фондов F_A и F_C составляют $Q_{A+C}(0) = Q_A(0) + K_A K_{AC}[F_C(0) - F_C(T)]$, $(F_C(0) \geq F_C(T))$. Наконец, $Q_{A+C+D}(0) = Q_{A+C}(0) + {}$ ${}+K_A K_{AC} K_{CD}[F_D(0) - F_D(T)]$, $(F_D(0) \geq F_D(T))$. Величины $Q_A(0)$, $Q_{A+C}(0)$, $Q_{A+C+D}(0)$ показывают, сколько нефти может быть добыто из изолированно рассматриваемых подсистем «A», «$A + C$», «$A + C + D$» соответственно при условии перевода фондов в заданные конечные состояния $F_A(T)$, $F_C(T)$, $F_D(T)$.

Анализируя потенциал фондов промышленных категорий, без учета их пополнения из F_C, имеем $Q_A(t) = Q_A(t-1) - Q(t)$. Как только величина $Q_A(t)$ становится отрицательной, это означает, что исходных возможностей фондов промышленных категорий хватает лишь для выполнения производственной программы $Q(t)$ до года $t - 1$ включительно. При анализе совместного потенциала фондов F_A и F_C с возможностью пополнения F_A из F_C , но без пополнения из F_D, получаем: $Q_{A+C}(t) = Q_{A+C}(t-1) - Q(t)$. Как только величина $Q_{A+C}(t)$ становится отрицательной, это означает, что совместных исходных запасов фондов F_A и F_C хватает лишь для выполнения производственной программы $Q(t)$ до года $t - 1$ включительно. Аналогичные соображения применимы и для анализа исходного потенциала всей системы фондов при возможности (односторонних) перетоков из фонда в фонд.

Имеется еще одна возможность быстрой проверки текущего состояния фондов. Если обозначить накопленную (суммарную) добычу за период прогнозирования в соответствии с производственной программой через $Q(1, T)$, то при $Q_{A+C+D}(0) \geq Q(1, T)$ производственная программа может быть выполнена без пополнения системы фондов извне, однако перетоки внутри системы могут оказаться необходимыми.

При $Q_{A+C}(0) \geq Q(1, T)$) можно обойтись только ресурсами подсистемы $F_A + F_C$ с возможными перетоками внутри нее и т.д. Видно, что на этом пути проверяются лишь интегральные возможности системы фондов и различных его подсистем без расчета динамики требуемого пополнения фондов. Однако, как показано далее, на базе этой идеи может быть разработан простой алгоритм расчета динамики пополнения фондов, требуемого в соответствии с производственной программой, который обходит необходимость решения оптимизационной задачи.

Влияние неопределенности. Алгоритм расчета траекторий пополнения. Масштабная инвариантность

Обратимся теперь к исследованию той же модели, но в условиях интервально-вероятностной неопределенности коэффициентов модели. Это необходимо сделать, поскольку значения коэффициентов перевода задаются на практике экспертно или по аналогии в виде интервальных оценок, размах которых увеличивается при переходе к фондам, находящихся на начальных стадиях изученности. Рекомендуемые экспертами интервалы значений этих коэффициентов приведены в таблице 2 [Кноринг, 1992].

Таблица 2. Интервальные оценки коэффициентов перевода

Тип фонда	Коэффициенты перевода
F_A	**K_A (КИН): 0.3 - 0.4**
F_C	K_{AC} (F_C => F_A): **0.6 – 0.9**
F_D	K_{CD} (F_D => F_C): **0.125 – 1.0**

Таким образом, значения всех коэффициентов перевода лежат в интервале от минимального значения (K_m), пессимистический сценарий, до максимального значения (K_M), оптимистический сценарий. Решая оптимизационные задачи для указанных сценариев, можно получить граничные траектории для требуемого пополнения всех фондов. Внутренняя часть этих трубок содержит все возможные (в рамках ограничений) траектории пополнения для различных сочетаний значений коэффициентов перевода. Чтобы изучить эту область, надо построить распределения вероятностей для объемов пополнения каждого фонда в каждом году периода прогнозирования. Естественно использовать для этого метод статистического моделирования, но способ, состоящий в решении оптимизационной задачи для каждой истории Монте-Карло не слишком рационален. Есть ли другая возможность решения задачи оценки динамики пополнения фондов?

Эта возможность связана с использованием оптимизационной стратегии «точно в срок» («Just in Time Strategy») и экспресс-моделей предыдущего раздела. Согласно этой стратегии надо с самого начала использовать возможности фондов промышленных категорий, затем, когда накопленная добыча превзойдет их, добавить потенциал фонда F_C, затем фонда F_D и только потом приступить к пополнению фондов извне.

Рассмотрим этот подход более подробно. Минимальные, по наличию нефти, возможности фондов F_A, F_C, F_D, связанные с реализацией минимальных значений надлежащих коэффициентов перевода, равны, соответственно, $Q_{Am}(0) = K_{Am}[F_A(0) - F_A(T)]$, $Q_{Cm}(0) = K_{Am}K_{ACm}[F_C(0) - F_C(T)]$, $Q_{Dm}(0)=K_{Am}K_{ACm}K_{CDm}[F_D(0) - F_D(T)]$. При сопоставлении этих величин с требуемой суммарной добычей за период прогнозирования $Q(1,T)$ имеем четыре возможности: а) $Q_{Am}(0) \geq Q(1,T)$, б) $Q_{Am}(0) + Q_{Cm}(0) \geq Q(1, T) \geq Q_{Am}(0)$, в) $Q_{Am}(0) + Q_{Cm}(0) + Q_{Dm}(0) \geq Q(1,T) \geq Q_{Am}(0) + Q_{Cm}(0)$), г) $Q(1,T) \geq Q_{Am}(0) + Q_{Cm}(0) + Q_{Dm}(0)$.

Рассмотрим ситуацию г). Пусть на интервале [K_{Am}, K_{AM}] экспертом задано распределение вероятностей. Разыграем значение K_A и найдем величину $Q_A(0)$, отвечающую этому значению коэффициента перевода. Если накопленная к окончанию года t добыча $Q(1, t)$ не превосходит $Q_A(0)$, то план добычи, предусмотренной производственной программой для всех лет, включая t, может быть выполнен только за счет фонда F_A. Если условие $Q_A(0) \geq Q(1, t)$ выполняется для лет $t = 1,\ldots, \tau$, то для года τ – последнего года, в котором еще можно покрыть потребности в нефти за счет F_A, выполняется неравенство $Q(1, \tau) \leq Q_A(0) < Q(1, \tau+1)$. Дефицит нефти ΔQ_A в F_A, который надо в году $\tau+1$ покрыть за счет фонда F_C, равен $\Delta Q_A = Q(1, \tau+1) — Q_A(0)$. Тогда при $t \in [1, \tau]$ в фонде F_A притоки $F_A^+(t) = 0$, $F_A^+(\tau+1) = \Delta Q_A/K_A$, а при $t \in [\tau+2, T]$ $F_A^+(t) = Q(t)/K_A$. Итак, начиная с года $t = \tau+1$, фонду F_A нужна подпитка из фонда F_C. При этом, начиная с $t = \tau+2$, $F_A(t) = F_A(T)$, что означает работу «точно в срок». Ясно, что это оптимальная стратегия по критерию минимума приведенных капитальных затрат на освоение нефтеносных участков (без учета операционных расходов).

Пусть на интервале $[K_{ACm}, K_{ACM}]$ экспертом задано распределение вероятностей. В дополнение к K_A разыграем значение K_{AC} и найдем величину $Q_C(0)$, отвечающую этому значению коэффициента перевода K_{AC}. Начиная с года $t = \tau+1$, производственная программа может быть выполнена за счет привлечения ресурсов фонда F_C, если $Q_C(0) \geq Q(\tau+1,t)$. Если это условие выполняется для лет $t \in [\tau+1, \sigma]$, то для года σ - последнего года, в котором еще можно покрыть потребности в нефти за счет F_C, выполняется неравенство $Q(\tau+1, \sigma) \leq Q_C(0) < Q(\tau+1, \sigma+1)$. Дефицит нефти ΔQ_C в фонде F_C, который надо в году $\sigma +1$ покрыть за счет фонда F_D, равен $\Delta Q_C = Q(\tau+1, \sigma+1) — Q_C$. Тогда при $0 \in [1, \sigma]$ в фонде F_C притоки $F_C{}^+(t) = =0$, $F_C{}^+(\sigma+1) = \Delta Q_C/(K_A K_{AC})$, а при $t \in [\sigma+2, T]$ $F_C{}^+(t) = Q(t)/(K_A K_{AC})$. Итак, с $t = \sigma+1$ фонду F_C нужна подпитка из фонда F_D. При этом, начиная с года $t = \sigma+2$, и до конца периода прогнозирования $F_C(t) = F_C(T)$.

Аналогичным образом для фонда F_D имеем: $Q_D(0) = [F_D(0) — F_D(T)]K_A K_{AC} K_{CD}$. Начиная с года $t =\sigma+1$, производственная программа $Q(t)$ может быть выполнена за счет привлечения ресурсов фонда F_D, если $Q_D(0) \geq Q(\sigma+1,t)$. Если это условие имеет место для лет $t \in [\sigma +1, \mu]$, то для года μ - последнего года, в котором еще можно покрыть потребности в нефти за счет F_D, выполняется неравенство $Q(\sigma+1, \mu) \leq Q_D(0) < Q(\sigma+1, \mu+1)$. Дефицит нефти ΔQ_D в фонде F_D, который надо в году $\mu+1$ покрыть за счет подпитки извне, равен $\Delta Q_D = Q(\sigma+1, \mu+1) — Q_D(0)$. Тогда при $t \in [1, \mu]$ в фонде F_D притоки $F_D^+(t) = 0$, $F_D^+(\mu+1) = \Delta Q_D/(K_A K_{AC} K_{CD})$, а при $t \in [\mu+2, T]$ $F_D^+(t) = Q(t)/(K_A K_{AC} K_{CD})$. Итак, с года $t = \mu+1$ фонду F_D нужна подпитка извне. При этом, начиная с года $t = \mu+2$, $F_D(t) = F_D^+(T)$.

Таким образом, разыгрывая значения K_A, K_{AC}, K_{CD}, для каждой истории Монте-Карло находим величину $t = \tau$ и, тем самым, временной диапазон $[1, \tau]$, в котором $F_A^+(t) = 0$, значение $F_A^+(\tau+1)$ и $F_A^+(t) = Q(t)/K_A$ для $t \in [\tau+2, T]$. Аналогичным образом в случае фонда F_C находится величина $t = \sigma > \tau$ и, тем самым, временной диапазон $[1, \sigma]$, в котором $F_C{}^+(t) = 0$, значение $F_C{}^+(\sigma+1)$ и $F_C{}^+(t) = Q(t)/(K_A K_{AC})$ для $t \in [\sigma+2, T]$; в случае фонда F_D находится величина $t = \mu > \sigma$ и, тем самым, временной диапазон $[1, \mu]$, в котором $F_D^+(t) = 0$, $F_D^+(\mu +1)$ и $F_D^+(t) = Q(t)/(K_A K_{AC} K_{CD})$ для $t \in [\mu +2, T]$.

Таким образом, теперь не нужно, разыграв значения коэффициентов перевода, каждый раз решать оптимизационную задачу. В предложенном алгоритме сделано упрощение по сравнению с моделью (1 – 3), состоящее в отказе от ограничений на возможности пополнения фондов, которые связаны с производственным и финансовым потенциалом инвестора. Этот недостаток преодолевается за счет использования диалогового режима «эксперт – модель». Оперативность получения результатов позволяет эксперту быстро оценить реализуемость текущего решения модели и ввести необходимые коррективы в исходные данные. Такие модели были названы нами «экспертными моделями» [Пороскун и др., 2002].

Вернемся к **ситуации** а). Здесь программа $Q(t)$ может быть выполнена только за счет фонда $F_A(t)$. Мы **не можем**, однако, теперь гарантировать выход на запланированное значение $F_A(T)$: получаемая при каждом текущем значении K_A конечная величина фонда A составляет $F_A(T) = F_A(0) — Q(1, T)/K_A$. Эти величины лежат в интервале $[F_A(0) — Q(1, T)/K_{Am}, F_A(0) — Q(1, T)/K_{AM}]$, и на этом интервале существует рассчитываемое распределение вероятностей. Фонды F_C и F_D остаются в этом случае нетронутыми.

В варианте б) мы можем выйти на значение $F_A(T)$ и не можем гарантировать достижение $F_C(T)$, а в варианте в) выходим на $F_A(T)$ и $F_C(T)$, но не гарантируем значения $F_D(T)$.

Обратим внимание на еще одно обстоятельство. С первого взгляда кажется, что для формирования распределений вероятности для ненулевых пополнений каждого года периода прогнозирования необходимо разыгрывание значений коэффициентов перевода. Это не совсем так. Дело в том, что, как мы видели, начиная с некоторого момента времени, случайные величины $\boldsymbol{F}^{+}(\boldsymbol{t})$, нормированные на $\boldsymbol{Q}(\boldsymbol{t})$, для всех последующих лет имеют одинаковый закон распределения вероятностей (свой для каждого фонда), следующий законам для случайных величин $1/\boldsymbol{K_A}$, $1/(\boldsymbol{K_A K_{AC}})$, $1/(\boldsymbol{K_A K_{AC} K_{CD}})$ соответственно. Это позволяет говорить о том, что величины $\boldsymbol{F}^{+}(\boldsymbol{t})/\boldsymbol{Q}(\boldsymbol{t})$ обладают свойством масштабной инвариантности, где $\boldsymbol{Q}(\boldsymbol{t})$ играют роль масштабных коэффициентов, что упрощает расчеты результирующих распределений для $\boldsymbol{F}^{+}(\boldsymbol{t})$. Эти распределения позволяют эксперту получить для каждого года прогнозного периода оценки для верхних границ пополнения фондов на выбранном им уровне вероятности.

Заключение

Предложен алгоритм расчета динамики объемов пополнения фондов нефти в их системе. Алгоритм отправляется от простой балансовой модели процесса пополнения. Результаты расчетов эквивалентны решениям задачи в оптимизационной постановке. Использование алгоритма позволяет упростить расчеты в условиях неопределенности, обходя необходимость многократного решения оптимизационной задачи. Дополнительным упрощающим расчет обстоятельством служит свойство масштабной инвариантности для распределений вероятностей компонентов пополнения фондов нефти.

Благодарности

The paper is published with financial support by the project ITHEA XXI of the Institute of Information Theories and Applications FOI ITHEA (www.ithea.org) and the Association of Developers and Users of Intelligent Systems ADUIS Ukraine (www.aduis.com.ua).

Библиография

[Кноринг, 1992] Кноринг Л. Стратегия подготовки запасов нефти и газа. СПб: Недра, 1992.

[Пороскун и др., 2002] Пороскун В., Стернин М., Шепелев Г. Экспертные модели прогнозных оценок подготовки и освоения запасов нефти. // Искусственный интеллект, 2002, №2, сс. 540-546.

[Стернин и др., 2007] Стернин М., Шепелев Г., Шепелев Н. Интеллектуальная поддержка прогнозных экспертных оценок подготовки и освоения запасов нефти. // «Интеллектуальные системы», Труды международной научно-технической конференции AIS'07. М.: Физматлит 2007, т. 2, сс. 105 – 106.

Информация об авторах

Михаил Стернин *– старший научный сотрудник Института системного анализа РАН. Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, ИСА РАН; e-mail: mister@isa.ru*

Геннадий Шепелёв *– заведующий лабораторией Института системного анализа РАН. Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, ИСА РАН; e-mail: gis@isa.ru*