ОБ ОПТИМИЗАЦИОННО-ИМИТАЦИОННОМ ПОДХОДЕ К ВЫБОРУ ТРАНСПОРТНЫХ СХЕМ ДОСТАВКИ ГРУЗОВ В ОТДАЛЕННЫЕ И ТРУДНОДОСТУПНЫЕ РЕГИОНЫ СТРОИТЕЛЬСТВА ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

О.В. Крылова, Ю.П. Степин (Москва)

Введение

Строительство объектов газовой отрасли требует поставок большого количества материально-технических ресурсов в течение длительного времени. При этом большое количество строек сегодня находится в отдаленных и труднодоступных регионах (на п-ове Ямал, Дальнем Востоке, арктическом шельфе и пр.) с неразвитой транспортной инфраструктурой, пропускная способность которых часто не позволяет своевременно доставить требуемые объемы грузов. Определить маршруты перевозки и распределение грузопотоков по ним важно как с точки зрения оптимизации затрат по доставке, так и для своевременного обеспечения строительства материальными ресурсами.

Решение задачи снижения совокупных затрат на доставку груза предполагает расчет и анализ себестоимости перевозок на каждом виде транспорта. Такой расчет, а также оценка длительности перевозки по возможным вариантам доставки для каждого типа ресурсов является отдельной трудоемкой задачей, особенно учитывая рыночные условия в сфере грузоперевозок и закрытость информации. Выяснить характеристики транспортной системы региона часто невозможно без выезда на объекты, официального общения с компаниями-перевозчиками, экспедиторами и владельцами инфраструктуры. Исходную информацию можно получить лишь на основе имеющихся данных о количестве и номенклатуре требуемых ресурсов. Поскольку на ранних стадиях проектирования такие номенклатурные перечни (составленные часто по объектам-аналогам) носят приближенный характер, исходные данные по тарифам и длительности перевозки имеют погрешности или являются усредненными.

При выборе оптимального плана поставки грузов по маршрутам следует учитывать: необходимость комбинирования различных способов перевозки (автомобильный, железнодорожный, морской, авиационный); ограничения пропускной способности участков перевозки, в том числе сезонные; согласованность сроков доставки ресурсов с календарным планом строительства и пр.;

Задачу распределения грузопотоков по участкам перевозки и периодам доставки можно рассматривать как задачу линейного программирования. В такой постановке задача решается, например, универсальным симплекс-методом и дает пригодное на начальных стадиях проектирования решение.

Однако для получения оптимального решения в реальных условиях (как правило, носящих случайный характер) необходимо учесть возможные задержки груза на участке перевозки, дополнительные затраты на участках перевозки, изменение пропускной способности, потери груза при перевозке или хранении.

Изначально нечетко заданные исходные данные, возможное привлечение большего числа организаций-посредников, чем предполагалось в первоначальных расчетах, проведение внеплановых работ с отвлечением большого числа материальных ресурсов, непредсказуемость погодных условий, возможные изменения тарифов и условий, форс-мажорные обстоятельства и др. определяют вероятностный характер модели выбора доставки.

В данной работе предлагается алгоритм взаимодействия оптимизационного и имитационного моделирования для решения задачи, который использует преимущества каждого из них.

Постановка задачи линейного программирования

В качестве исходных данных имеются: возможные участки перевозки, с учетом тарифов на перевозку и хранение в промежуточных точках, пропускные ., Данные для решения ЗЛП носят среднестатистический характер, т. е. принимаются с учетом средних отклонений указанных величин. Схему участков транспортировки удобно представить в виде ориентированного графа, дуги которого отражают участки перевозки, вершины – точки начальные, конечные и промежуточные.

В общем виде задача представляет собой модель вида:

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T} c_{it} x_{it} \to \min \qquad (1)$$

при ограничениях:

$$\sum_{i \in I} a_{it} x_{it} \le b_{it} \qquad (2)$$

$$\sum_{i \in I} k_{ik} x_{it} = d_k ; k \in K \qquad (3)$$

$$\vee\, i \in I, t \in T; x_{it} \ge 0 \qquad (4)$$

где x_{it} – количество груза на участке перевозки i в период времени t. Так как задача записана в обобщенном виде, i обозначает как участки перевозки, так и пункты хранения, начальные и конечную точки; c_{it} –стоимость транспортировки по участку или хранения единицы груза, либо штраф за недоставку в срок, который также пропорционален соответствующему количеству груза;

Ограничения – неравенства (2) – отражают ограничения по пропускной способности участков перевозки в период времени t;

Ограничения – равенства (3) – отражают структурные ограничения в зависимости от топологии транспортной сети, а также ресурсные ограничения;

Ограничение (4) обеспечивает неотрицательность переменных.

Принцип работы имитационной модели

Для реализации имитационной модели предлагается использовать принцип системной динамики, поскольку на этапе планирования транспортных схем и в условиях недостатка информации детальность проработки модели не так важна. Необходимо проследить механизмы обратных связей в системе, взаимозависимости переменных, рассматривая при этом систему достаточно укрупненно.

Основными величинами, исследуемыми в результате моделирования, являются итоговое количество доставленных ресурсов на точку строительства, а также загрузки участков перевозки и связанные с этим возможные чрезвычайные ситуации: задержки, увеличение затрат, потери. Основными уровнями являются количество ресурсов в начальной, промежуточных точках и точке строительства. Изменение этих уровней определяется темпами доставки грузов, темпами потерь и темпом использования ресурсов, т.е. непосредственно строительством.

Описание оптимизационно-имитационного алгоритма

С каждым вариантом решения ЗЛП, характеризуемым набором параметров $X=[x_1 \ldots. x_n]$, связаны числовые параметры $f_j(X,w)$, зависящие также от случайных воздействий и динамики функционирования системы и получаемые с использованием имитационной модели в зависимости от поведения среды *w*.

Получение наиболее приемлемого плана транспортировок подразумевает поиск таких решений *X,* при которых среднее значение параметра $f_j(X,w)$ принимает наименьшее значение при различных значениях характеристик среды, а также определенных ограничениях на значения остальных параметров. Поэтому в качестве критерия оптимальности с учетом стохастического характера переменных выступают условия достижения экстремума математического ожидания целевой функции, задающей вероятность достижения цели при различных альтернативах:

$$F^*(x) = Mf(x,w) \to \min \tag{5}$$

$$x \in X. \tag{6}$$

Одним из способов вычисления функции цели (5) с учетом всевозможных вариантов характеристик среды, является построение имитационной модели и «проигрывание» этих характеристик. Вычисление целевой функции (5) в таком случае требует проведения некоторого количества экспериментов, в зависимости от сложности модели. Функция цели (5) представляет собой нелинейную функцию, а задачи нелинейного программирования, как известно, успешно решаются с помощью градиентных методов. Если известен градиент gradF*(x) = (∂F*/∂x1,…∂F*/∂xn), то поиск минимума функции происходит с помощью приращения вектора решения в направлении антиградиента с некоторым шагом ρs.

Таким образом, двигаясь в направлении антиградиента, вычисляемого на каждом шаге с помощью имитационной модели, реализуется механизм адаптации, т.е. принятие решений в процессе функционирования системы на основе явного или неявного извлечения информации из наблюдений, что приводит к частичному или полному устранению неопределенности.

Вычисление градиента предполагает непрерывность и дифференцируемость исследуемой функции. Однако с учетом того, что *F*(x)*в рассматриваемой задаче не задана в аналитическом виде, а рассчитывается по результатам имитаций, точное значение градиента неизвестно.

В таком случае предлагается вычислять вектор, близкий к градиенту функции в некоторой точке по результатам нескольких имитационных экспериментов следующим образом:

В результате проведения эксперимента в точке X_0 запоминаются не только значения итоговой функции цели, но и общие затраты на каждом участке перевозки с учетом случайных отклонений, потерь, дополнительных затрат и пр. Функция цели вычисляется по нескольким экспериментам и с учетом (1) представляет собой:

$$Mf(x,w) = \sum_{i\in I}\sum_{t\in T} M(c_{it}) * x_{ti}. \tag{7}$$

Тогда вектор *M(C)* и есть нужный нам случайный вектор $\nabla f(x_0)$, близкий к градиенту *Mf(x,w)*. Случайность его определяется тем, что он получен лишь по некоторому количеству имитаций, а не по всем возможным значениям параметров среды, поскольку вместо значений Mf(x,w) в процессе имитационного моделирования наблюдаются отдельные случайные реализации величин *f (X,w)*.

В оптимизационных задачах с ограничениями выбор направления спуска сопряжен с необходимостью постоянной проверки того, что новое значение x_{s+1} должно так же, как и предыдущее, x_s удовлетворять системе ограничений задачи.

Для учета ограничений в задаче предлагается использовать метод возможных направлений. Идея его заключается в том, что среди всех возможных направлений в точке X_s выбирают то, вдоль которого функция *F*(x,w)* убывает быстрее всего, и затем осуществляют спуск вдоль этого направления. То есть, решая задачу вида

$$\nabla f(x_s) * y \to \min \tag{8}$$

с учетом ограничений вида (2)–(4), определяем оптимальное направление корректировки решения с учетом ограничений исходной задачи. Если y_s – оптимальное решение задачи, то вектор Gs $= \nabla f(x_s) * y_s$ – направление оптимального приращения вектора решения.

Затем определяется длина шага ρ_s для приращения вектора решения. Изначально p^s принимается равным единице, однако после вычисления нового значения решения X_{s+1}, производится сравнение $f(X_{s+1})$ и $f(X_s)$, если $f(X_{s+1}) \le f(X_s)$, то решение X_{s+1} фиксируется и алгоритм переходит к следующему шагу. В противном случае шаг уменьшается вдвое до тех пор, пока новая функция цели не будет меньше предыдущей. Таким образом, шаг уменьшается вблизи точки экстремума.

И, следовательно, новое значение вектора *Xs+1* определяется следующим образом: $X_{s+1} = p_s * \nabla f(x_s) * y_s + X_s$ (9)

Таким образом, на каждом шаге задача определения нового значения вектора X_s состоит из двух этапов: выбора направления и выбора длины шага при движении по этому направлению.

Общий алгоритм решения задачи с использованием имитационного модели следующий:

1 шаг. Генерация первого приближения решения X_0 путем решения задачи линейного программирования в детерминированной первоначальной постановке с учетом ограничений;

2 шаг. По результатам нескольких имитаций определяется F*(Xs), одновременно запоминаются значения переменных C_{it}, b_{it} по участкам перевозки;

3 шаг. Исходя из результатов имитаций, вычисляется вектор $\nabla f(x_s)$ близкий к градиенту функции *F*(x)* в точке *Xs*. Если $|\nabla f(x_s)| \le \varepsilon$ (где ε – уровень точности), то полученное решение Xs и есть итоговое, в противном случае – переход к шагу 4;

4 шаг. Определяется оптимальное направление спуска решением задачи (8);

5 шаг. Определяется шаг p^s изменения вектора решения;

6 шаг. Производится вычисление нового вектора решения X_{s+1} по формуле (9);

7 шаг. С использованием имитационной модели определяется значение $F^*(X_{s+1})$. Проверяется близость решения к оптимальному, по уровню точности α:

$$F^*(X_s) - F^*(X_{s+1}) \le \alpha \tag{10}$$

Если ограничение (10) выполняется, то решение найдено, иначе – переход к шагу 3;

8 шаг. В случае нахождения на 7 шаге оптимального решения, фиксируются переменные, обеспечивающие это решение.

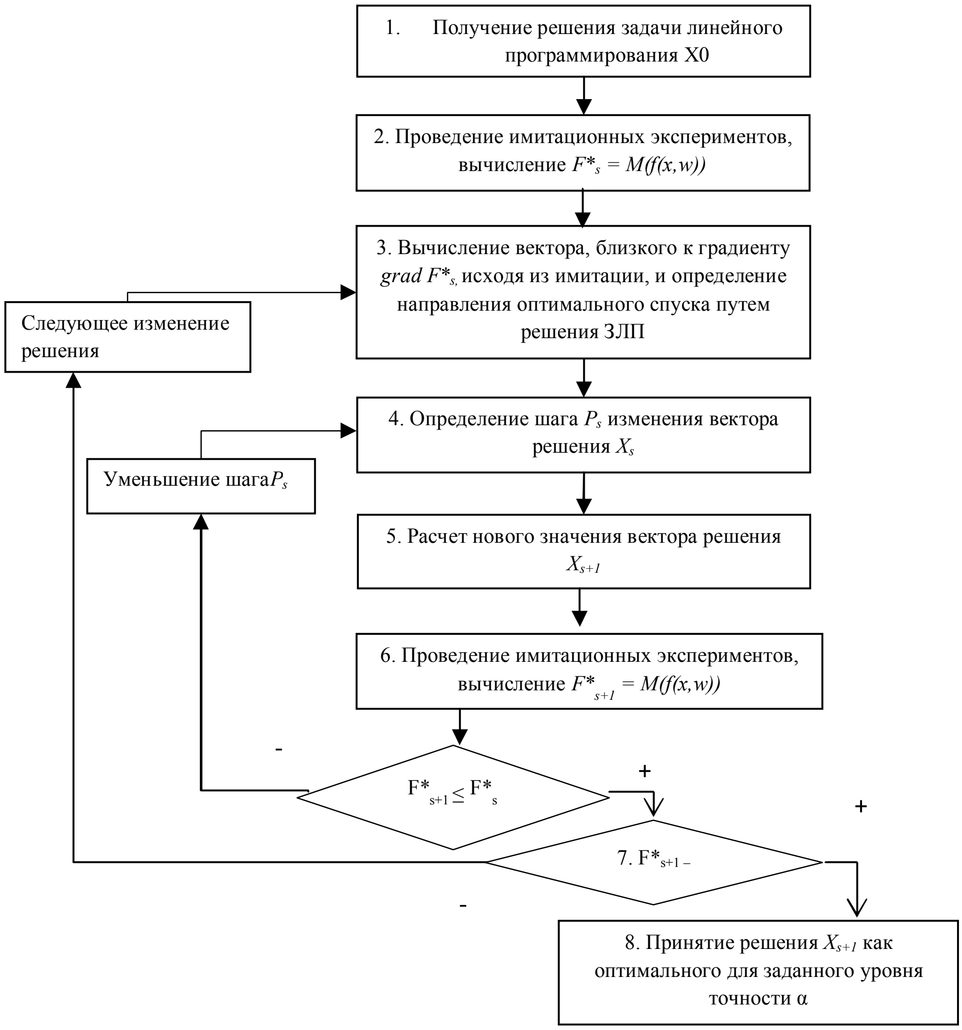

Рис. 1. Общая схема оптимизационно-имитационного алгоритма

Литература

1. **Цвиркун А.Д., Акинфиев В.К., Филиппов В.А.** Имитационное моделирование в задачах синтеза структуры сложных систем (оптимизационно-имитационный подход). – М.: Наука, 1985.
2. **Almeder C., Preusser M..** A toolbox for simulation-based optimization of supply chains. Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference, pp. 1932–1939.
3. **Ермольев Ю.М**. Методы стохастического программирования. – М.: Наука, 1976. – 340 с.
4. **Мицель А.А., Шелестов А.А.** Методы оптимизации. Ч. 1: учебное пособие. – Томск: Томский межвуз. центр дистанц. образования, 2002. – 192 с.
5. **Шахназарова И.В.** Синтез децентрализованной системы обработки информации и управления нефтегазодобывающим предприятием: дис. … канд. техн. наук. – М.: ВНИИОЭНГ, 1984.
6. **Растригин Л. А**. Адаптация сложных систем. – Рига: Зинатне, 1981. – 375 с.
7. **Крылова О.В., Степин Ю.П.** Модель системной динамики для оптимизационно-имитационного подхода к выбору схем доставки ресурсов // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. – 2012. – № 3. – С. 13–16.