УДК 681.3

ОПТИМИЗАЦИЯ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА КАК СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ

А.П. Сизиков

Самарский государственный экономический университет
113043, г. Самара, ул. Советской Армии, 141
E-mail: apsizikov@mail.ru

Рассматривается задача оптимизации нефтеперерабатывающего производства, представленного двухуровневой моделью. Предложен алгоритм увязки локальных решений с целью достижения общего оптимального результата. Описанная методика реализована в авторском программном продукте.

Ключевые слова: *системный анализ, сложная система, оптимизация, двухуровневая модель, механизм согласования критериев, нефтепереработка.*

Введение. В системотехнике сложной называется система, элементы и связи которой неоднородны. Сложную систему, в отличие от большой, по определению невозможно описать одной или множеством однотипных моделей, ее описание требует использования моделей различных типов. Из присущего системе свойства целостности (иначе бы набор элементов нельзя было назвать системой) вытекает необходимость системного подхода, т.е. необходимость разработки такого механизма, при котором функционирование каждого элемента подчиняется достижению целей всей системы. В теории оптимизации этот подход реализуется путем использования различных методов согласования решений отдельных подзадач для получения оптимального общего результата.

Многие сложные производственные системы целесообразно представлять двухуровневыми моделями. Эти модели интересны не только сами по себе, но и как инварианты многоуровневых систем [1]. Существуют различные методы их алгоритмизации. Базовым считается такой, при котором координирующая функция осуществляется с помощью симплексных мультипликаторов, трактуемых как теневые цены продуктов и ресурсов. В статье рассматривается одна из таких моделей на примере нефтеперерабатывающего производства.

Формализованное описание и модель объекта. Нефтеперерабатывающее производство в целом можно представить в виде сетевого направленного графа. Множество дуг этого графа отражает потоки нефтепродуктов. Множество вершин (узлов) соответствует технологическим установкам, смесевым пулам и резервуарам. Резервуары играют в системе роль развязок. Они не вводятся в модель явно (по крайней мере, в статическую модель), но благодаря им все потоки в системе относительно установок разделяются на входящие и исходящие. Входящий поток есть поток «резервуар $\rightarrow$ установка», исходящий – «установка $\rightarrow$ резервуар». Каждый нефтепродукт может быть представлен в модели несколькими входящими потоками или не представлен ни одним [2, 3].

Установка – сложный технологический агрегат. Выход результирующих продуктов определяется коэффициентами отбора. Последние зависят от пропорций

Александр Павлович Сизиков – к.т.н., доцент.

входящих потоков, свойств этих потоков и режима работы установки. В конечном итоге количество и качество исходящих потоков каждой установки зависят от качества нефти и технологии ее переработки на всех предшествующих стадиях.

Большинство товарных продуктов получают путем смешения полуфабрикатов. Продукт смешения должен удовлетворять требованиям по качеству. Каждый продукт смешения имеет спецификацию, в которой требования по качеству задаются в виде односторонних или интервальных ограничений. Качество смеси зависит от пропорций смешения и соответствующих свойств компонентов. Пункты смешения можно формально рассматривать как установки с единственным исходящим потоком и соответствующим коэффициентом отбора, равным единице.

Задача состоит в расчете оптимальной «технологии» – материального баланса всего производства, загрузки и режимов работы установок, а также от рецептур получения продуктов смешения. Критерием оптимальности является свертка вектора, состоящего из набора технико-экономических показателей, таких как, например, покрытие, рентабельность, выход светлых, глубина переработки нефти. Возможны варианты, при которых один или несколько показателей входят в целевую функцию, остальные – в систему ограничений.

Задача с учетом всех факторов настолько сложна, что не может быть решена напрямую по какой-то одной модели. Поэтому используется подход, который состоит в отказе от попыток решить ее на базе «монолитной» матричной модели, а вместо этого объект представлен как сложная система, т.е. как набор математически разнородных взаимодействующих элементов.

В данном случае предложена модель, имеющая двухуровневую иерархическую структуру. На первом (верхнем) уровне находится базовая модель, т. е. агрегированная матричная модель производства как целого. Основу этой модели составляет блок «затраты – выпуск». Каждый столбец соответствует какому-либо узлу сетевой потоковой модели и рассматривается как агрегат соответствующего объекта – установки или смесевого пула. Модели технологических установок и смесевых пулов составляют второй уровень системы.

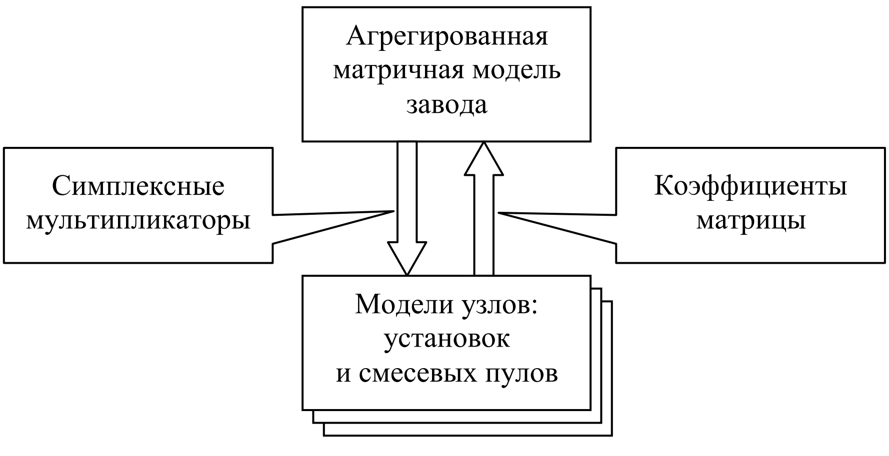

Рис. 1. Схема взаимодействия моделей

При таком подходе взаимодействие между элементами системы осуществляется не прямо, а через посредство «центра». Механизм согласования решений локальных задач (режимов отдельных установок и рецептур смешения) с целью достижения оптимального общего решения вытекает из представления о модели первого уровня как обобщенной модели Вулфа, допускающей вариабельность параметров в рамках одной постановки задачи.

Задача решается с помощью вычислительной схемы, которая строится на базе симплексного алгоритма с использованием механизма генерирования столбцов [4]. Столбцы генерируются в результате решения задач второго уровня. Агрегированная матричная модель играет роль координатора этих решений. Эту функцию она осуществляет путем расчета симплексных мультипликаторов, которые трактуются в данном случае как «теневые цены» нефтепродуктов и ресурсов. Каждая локальная модель с учетом этих «теневых цен» оптимизирует собственную технологию и, соответственно, коэффициенты представляющего ее столбца «затраты – выпуск», а затем передает их в агрегированную матричную модель (рис. 1).

Первый уровень: модель и алгоритм. Поскольку при заданных коэффициентах отбора исходящие потоки полностью определяются входящими, задача сводится к расчету интенсивностей входящих потоков, т. е. к расчету количества нефтепродуктов, поступающих на вход каждой установки за определенный период. Пусть J – множество входящих потоков системы, x_j – интенсивность j-того потока. Тогда ограничения по загрузке технологических установок следует записать так:

$$\sum_{j \in J_n} x_j \in \left[L_n^-,\ L_n^+\right],\ n \in N\ , \tag{1}$$

где N – множество установок; J_n – множество входящих потоков для n-й установки; L_n^-, L_n^+ – пределы допустимой загрузки n-й установки.

Ограничения по поставкам сырья и полуфабрикатов, поступающих со стороны:

$$\sum_{j \in J_i} x_j \in \left[S_i^-,\ S_i^+\right],\ i \in I_0, \tag{2}$$

где I_0 – множество наименований нефтепродуктов, поступающих со стороны; S_i^-, S_i^+ – ограничения на поставки i-го нефтепродукта; J_i – множество входящих потоков, которыми представлен i-й нефтепродукт.

Ограничения по условиям материального баланса для полуфабрикатов собственного производства:

$$\sum_{n \in N_i} \sum_{j \in J_n} a_{in} x_j - \sum_{j \in J_i} x_j = 0,\ \ i \in I_1\ , \tag{3}$$

где I_1 – множество полуфабрикатов собственного производства; N_i – множество установок, производящих i-й нефтепродукт; a_{in} – коэффициент отбора i-го продукта в n-й установке.

Ограничения по производству товарной продукции:

$$\sum_{n \in N_i} \sum_{j \in J_n} a_{in} x_j - \sum_{j \in J_i} x_j \in \left[D_i^-, \quad D_i^+ \right], \; i \in I_2, \tag{4}$$

где I_2 – множество наименований товарной продукции; D_i^-, D_i^+ – допустимые объемы производства i-го товарного продукта.

В базовом варианте модели используются упрощенные модели смешения. Если эти требования формулируются в виде интервальных ограничений, то можно записать так:

$$\sum_{j \in J_m} \left(q_{kj} - q_{km}^- \right) x_j \geq 0, \quad \sum_{j \in J_m} \left(q_{kj} - q_{km}^+ \right) x_j \leq 0, \; m \in M, \; k \in K_m, \tag{5}$$

где M – множество товарных продуктов, получаемых смешением; K_m – множество показателей качества, контролируемых для m-го продукта; J_m – множество входящих потоков для пункта смешения m-го продукта (компоненты смеси); q_{kj} – значение k-го показателя качества для j-го потока; q_{km}^-, q_{km}^+ – соответственно нижний и верхний допустимые уровни k-го показателя качества для m-го продукта смешения.

Из всех вариантов, удовлетворяющих условиям (1) – (5), необходимо выбрать такой, при котором достигается максимум некоторого критерия. Критерии делятся на две категории: 1) базовые общеэкономические критерии (прибыль, рентабельность); 2) технико-экономические показатели, специфичные для нефтепереработки (выход светлых нефтепродуктов, глубина переработки нефти).

Все эти критерии можно выразить как линейные функции интенсивностей потоков. Рассмотрим, например, прибыль. Механизм ее формирования можно представить следующим образом:

$$\Pi = Q - (V + C) = \sum_{i \in I_2} c_i^+ z_i - \left(\sum_{i \in I_0} c_i^- \sum_{j \in J_i} x_j + \sum_{n \in N} \beta_n \sum_{j \in J_n} x_j + C \right) \to \max,$$

где z_i – выход i-го товарного продукта; c_i^+ – цена i-го продукта; c_i^- – цена i-го полуфабриката, поступающего извне; β_n – коэффициент затрат на n-й установке (имеется в виду стоимость топлива и электроэнергии; в первом приближении можно считать, что эти затраты пропорциональны фактической загрузке установки); I_2 – множество наименований товарных продуктов.

Раскрывая скобки и отбрасывая независимые от x условно-постоянные затраты, получим целевую функцию в следующей форме:

$$\sum_{i \in I_2} c_i^+ z_i - \sum_{i \in I_0} c_i^- \sum_{j \in J_i} x_j - \sum_{n \in N} \beta_n \sum_{j \in J_n} x_j \to \max.$$

Ввиду того, что выходы товарных продуктов не фигурируют в модели как независимые переменные, а выражаются через интенсивности входящих потоков, целевую функцию следует переформулировать так:

$$\sum_{i \in I_2} c_i^+ \left(\sum_{n \in N_i} \sum_{j \in J_n} a_{in} x_j - \sum_{j \in J_i} x_j \right) - \sum_{i \in I_0} c_i^- \sum_{j \in J_i} x_j - \sum_{n \in N} \beta_n \sum_{j \in J_n} x_j \to \max.$$

Меняя порядок суммирования и осуществляя простейшие преобразования, можно в конце концов привести целевую функцию к весьма простому виду:

$$\sum_{j \in J} p_j x_j \to \max , \qquad (6)$$

где p_j – удельное покрытие j-го потока.

Для удобства дальнейшего изложения запишем модель (1) – (6) в обобщенной канонической форме:

$$\max\{(c, x) \mid Ax = b, x \ge 0\},$$

где c – вектор коэффициентов целевой функции; A – матрица условий; b – вектор ограничений.

Каждый столбец расширенной матрицы этой задачи является представителем (агрегатом) модели соответствующего узла (установки, смесевого пула), или, иначе говоря, вектором из некоторого множества

$$\tilde{a}_j = (c_j, a_{1j}, a_{2j}, \ldots a_{mj})^T \in M_j, \ j = 1,2,\ldots n , \qquad (7)$$

где M – множество возможных «технологий» соответствующего узла. Решение обобщенной задачи сводится к формированию оптимального базиса путем генерирования столбцов, являющихся крайними точками допустимых множеств технологий M_j, $j = 1, 2, \ldots n$.

Алгоритм:

1. Формируем начальный вариант задачи, включая в матрицу условий по одному представителю множеств M_j, $j = 1,2,\ldots n$. Решаем эту задачу симплекс-методом с обратной матрицей, находим оптимальный базис и соответствующую ему обратную матрицу.

2. Вычисляем соответствующие текущему базису симплексные множители $\pi = c_B B^{-1}$, где c_B – коэффициенты целевой функции при базисных столбцах. Эти множители трактуются в данном случае как «цены» нефтепродуктов и ресурсов.

3. Каждая установка или смесевой пул оптимизирует собственную «технологию», учитывая «цены» входящих и исходящих продуктов и ресурсов:

$$\Delta_j = \min_{c, a} \left\{ (\pi, a_j) - c_j \middle| (c_j \mid a_j)^T \in M_j \right\}, \quad j = 1,2,\ldots n . \qquad (8)$$

То есть каждый узел формирует отклик в виде столбца $\hat{a}_j = (\hat{c}_j, \hat{a}_{1j}, \hat{a}_{2j}, \ldots \hat{a}_{mj})^T$, полученного из условия минимизации соответствующей оценки замещения.

4. Проверяем условие $\Delta_v = \min\{\Delta_j\} \ge 0$. Если оно выполняется, то текущий базис оптимален, переходим в п. 6. В противном случае переходим в следующий пункт.

5. Вводим в базис столбец $\hat{a}_v = (\hat{c}_v, \hat{a}_{1v}, \hat{a}_{2v}, \ldots \hat{a}_{mv})^T$. Формируем новую матрицу B^{-1}. Столбец, выводимый из базиса, удаляем из задачи. Переходим в п. 2.

6. Выдача решения.

Если множества M представляют собой многогранники, то решение, если оно существует, находится за конечное число итераций. Действительно, представим себе, что все столбцы, соответствующие крайним точкам этих множеств, введены в модель заранее (что, разумеется, в общем случае сделать практически невозможно). Тогда получается обычная задача линейного программирования.

Если же среди M есть множества, не являющиеся многогранными, то сходимость за конечное число итераций не гарантируется, поскольку такие множества имеют бесконечное число крайних точек. Но в любом случае процесс сходится монотонно и идет до тех пор, пока на двух смежных итерациях не будут получены практически одинаковые результаты.

Пример модели второго уровня. Выражение (8) является обобщенной, принципиальной формой записи локальных задач. В реальности каждая из них формулируется на основе модели соответствующего узла. В качестве примера рассмотрим установку первичной переработки нефти [3]. Здесь происходит разделение смеси с непрерывным фракционным составом (нефти) на ряд целевых продуктов. На показатели качества каждого продукта наложены ограничения. В пределах заданных ограничений распределение фракций между целевыми продуктами неоднозначно. Оптимизация этого процесса сводится к известной в исследовании операций «задаче о точках на прямой»:

$$\max_{x}\left\{\sum_{n=0}^{N} f_n\left(x_n, x_{n+1}\right) \middle| \, 0 = x_0 \le x_1 \le \ldots \le x_N = L\right\}, \tag{9}$$

где L – число узких фракций; N – число целевых продуктов; x – точки разделения нефти на целевые продукты по узким фракциям; $f_n\left(x_n, x_{n+1}\right)$ – свертка векторного критерия, характеризующего целевой продукт с точки зрения ценности и соответствия спецификации.

Встроить эту задачу в «монолитную» линейную модель невозможно. При использовании же системного подхода никаких принципиальных трудностей не возникает. Для этого задачу нужно сформулировать по типу (8), т.е. составить критерий так, чтобы он содержал общесистемную составляющую:

$$f_n\left(x_n, x_{n+1}\right) = \pi_n\left(x_n, x_{n+1}\right) - \beta_n \psi_n\left(x_n, x_{n+1}\right), \tag{10}$$

где π_n – симплексный множитель, сформированный для данного целевого продукта в основной модели и играющий здесь роль его цены; ψ_n – штрафная составляющая; β_n – коэффициент свертки, с помощью которого задается соотношение между составляющими критерия.

Штрафная составляющая вводится для обеспечения показателей качества продуктов. Она представляет собой взвешенную сумму квадратов относительных отклонений (в нижнюю или верхнюю сторону) расчетных значений показателей от заданных:

$$\psi_n\left(x_n, x_{n+1}\right) = \sum_{k=1}^{K} q_{nk} \delta_{nk}^2\left(x_n, x_{n+1}\right), \tag{11}$$

где K – число показателей качества; q_{nk} – экспертная оценка приоритета показателя; δ_{nk} – относительное отклонение расчетного значения показателя от допустимых пределов.

$$\delta_{nk}(x_n, x_{n+1}) = \begin{cases} \left(p_{nk} - p_{nk}^{+}\right) / p_{nk}^{+}, \text{ если } p_{nk} > p_{nk}^{+}, \\ \left(p_{nk} - p_{nk}^{-}\right) / p_{nk}^{-}, \text{ если } p_{nk} < p_{nk}^{-}, \\ 0, \text{ если } p_{nk} \in \left[p_{nk}^{-}, \quad p_{nk}^{+}\right], \end{cases} \tag{12}$$

где p_{nk}^{-}, p_{nk}^{+} – нижний и верхний допустимые переделы показателя; $p_{nk} = p_{nk}(x_n, x_{n+1})$ – расчетное значение показателя, которое в общем случае значения показателей, соответствующих тем или иным вариантам разделения, можно рассчитать по формуле вида

$$p_{nk}(x_n, x_{n+1}) = I_k^{-1}\left(\sum_{i=x_n}^{x_{n+1}} I_k(\rho_{ik})\Delta_i \Big/ \sum_{i=x_n}^{x_{n+1}} \Delta_i \right), \tag{13}$$

где $\rho_{i1}, \rho_{i2}, \ldots$ – показатели i-й узкой фракции; I – так называемая индексная функция.

Индексная функция, как правило, представляет собой ряд громоздких математических выражений, которые в общем случае могут содержать транзитивные зависимости и логические операторы (см. таблицу). Поэтому для решения задачи используется метод динамического программирования, так как он индифферентен к виду и способу задания целевой функции.

Индексные функции некоторых показателей

Показатель	Индексная функция I	Обратная функция I^{-1}
Вязкость V	$-(41{,}11 - 49{,}08 \cdot \lg(\lg(V + 0{,}8)))$	$10\hat{\ }(10\hat{\ }(41{,}11 + I^{V})/49{,}08) - 0{,}8$
Темп-ра вспышки T_B	$-10\hat{\ }(42{,}1 + \lg((T_B + 460)\hat{\ }14{,}3))$	$-10\hat{\ }((42{,}1 - \lg(I_B))/14{,}.3) - 460$
Темп-ра помутнения $T_П$	$(0{,}0026415 \cdot (T_П + 460))\hat{\ }20$	$I_П^T\hat{\ }0{,}05/0{,}0026415\ -460$
Темп-ра помутнения $T_З$	$E\hat{\ }(-73{,}09 \cdot (T_З + 460)\hat{\ }12{,}89)$	$E\hat{\ }((73{,}09 + \ln I_З^{Y})/12{,}89) - 460$

Задача представляется как N-шаговый процесс принятия решений. Под состоянием процесса на n-м шаге понимается начальная фракция; под управлением u_n – число включаемых в текущий продукт узких фракций; под функцией шагового дохода – $f_n(x_{n,} x_{n+1})$. Рекуррентное соотношение Беллмана в данном случае выглядит так:

$$F_n(x_n) = \max_{u_n \in U_n} \{f(x_n, x_{n+1}(u_n)) + F_{n+1}(x_{n+1}(u_n))\}, \quad n = 0, 1, \ldots N-1, \tag{14}$$

где U_n – множество допустимых управлений текущего шага; F – функция состояния, $F_N(x_N) = 0$.

Алгоритм:

1. В области допустимых вариаций температурных границ строим сетевой направленный граф. Строим так, что множество его путей соответствуют множеству

допустимых решений задачи. Узлы группируются по уровням, соответствующим шагам процесса, и образуют множества X_0, X_1, …, X_N, причем X_0 и X_N содержат по одному узлу.

2. Двигаемся от конца к началу так, что $n = N-1,\ N-2,\ \ldots 0$. На каждом шаге для всех $x_n \in X_n$ решаем задачу (14), в результате чего находим условно-оптимальное управление $\hat{u}_n(x_n)$ и потенциал $F_n(x_n)$.

3. Получаем решение $\hat{x} = (\hat{x}_1, \hat{x}_2, \ldots \hat{x}_N)$, определяя каждую следующую оптимальную точку через предыдущую, т.е. по цепочке:

$$\hat{x}_1 = \hat{u}_0(0) \to \hat{x}_2 = \hat{u}_1(\hat{x}_1) \to \ \ldots \ \to \hat{x}_N = \hat{u}_{N-1}(\hat{x}_{N-1}).$$

4. В результате получаем оптимальные значения отборов и коэффициенты столбца, которым эта установка представлена в основной модели:

$$\hat{a}_n(\pi) = \frac{\hat{x}_n - \hat{x}_{n-1}}{\hat{x}_N}, \quad n = 1, 2, \ldots N .$$

Таким образом, для модели первого уровня формируется отклик в виде коэффициентов выхода целевых продуктов, зависящих от их (этих продуктов) оценок. Эти коэффициенты, в свою очередь, могут повлиять на оценки, и тогда потребуется очередной шаг корректировки решения.

Заключение. Описанный подход воплощен в компьютерной программе, которую можно классифицировать как предметно-ориентированную систему оптимизации [6]. Она включает в себя базу данных, оболочку и оптимизатор, состоящий из ведущего модуля и набора *dll*-компонентов для моделирования отдельных составляющих системы. Работа с программой, а по сути дела, с базой данных (описание технологии, задание условий, получение результатов) осуществляется пользователем с помощью оболочки. Она предоставляет пользователю совокупность экранных форм, в которых отображаются запросы (виртуальные таблицы), извлеченные из базы данных.

От универсальных пакетов оптимизации, таких как, например, пакет линейного программирования, предметно-ориентированные системы вообще и данная программа в частности отличаются тем, что включают в себя кроме функций оптимизатора средства автоматического генерирования задачи. Пользователь избавлен от необходимости формулировать задачу математически. Его функция ограничивается лишь описанием задачи на содержательном, предметном уровне.

Программа выдает оптимальный материальный баланс и соответствующие ему обобщенные показатели при заданных условиях, а также рекомендации о том, как нужно изменить эти условия (разумеется, если это возможно), чтобы улучшить основные технико-экономические показатели. Если условия, заданные пользователем, окажутся противоречивыми, программа предложит компромиссный вариант.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Моисеев Н.Н.* Математические задачи системного анализа. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981.
2. *Суворов Б.П.* Математические методы и модели в планировании нефтеперерабатывающей промышленности. – М.: Наука, 1969.
3. *Дудников Е.Е., Цодиков Ю.М.* Типовые задачи управления непрерывным производством. – М.: Энергия, 1979.

4. *Лэдон Л.* Оптимизация больших систем. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1975.
5. *Сизиков А.П.* Система оптимизации материальных балансов нефтеперерабатывающих предприятий // Изв. Самар. науч. центра Рос. акад. наук «Актуальные проблемы экономики». – 2003. – Май. – Спец. вып.
6. *Сизиков А.П.* Программный продукт СМОННП (система оптимизации нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств). Управление большими системами / Сборник трудов. Вып. 24. – М.: ИПУ РАН, 2009.

Статья поступила в редакцию 3 сентября 2010 г.

UDC 681.3

OPTIMIZATION OF REFINERY AS A COMPLEX SYSTEM

A.P. Sizikov

Samara State Economic University
141, Soviet Army st., Samara, 113043

The problem of optimization of refinery, described a two-level model. An algorithm for the coordination of local solutions in order to obtain optimal results. The described technique is implemented in software product.

Keywords: *systems analysis, complex system, optimization, two-level model, coordination of local solutions, refinery.*

Alexsander P. Sizikov - Candidate of Technical Sciences, Associate professor.