

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ РАЗВИТИЯ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ЗАВОДА ПО НЕПОЛНЫМ ДАННЫМ

IDENTIFICATION OF PARAMETERS OF MODEL OF DEVELOPMENT OF OIL REFINING FACTORY ACCORDING TO INCOMPLETE DATA

Yu Tsodikov

Summary. The task of developing an optimization model to select the best option for the reconstruction and development of an oil refinery based on incomplete data is considered. The mathematical formulation of the problem of the optimal planning of the refinery is given. A method for determining the parameters when developing a plant model in these conditions, based on the experience of performing such projects, is described. An example of a refinery model is given.

Keywords: technological model of development of an oil refinery, optimization nonlinear models, multi-period models.

Цодиков Юлий Моисеевич

*К.т.н., н.с., Институт проблем управления
им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва
tsodikov@ipu.ru*

Аннотация. Рассмотрена задача разработки оптимизационной модели для выбора лучшего варианта реконструкции и развития нефтеперерабатывающего завода по неполным данным. Приведена математическая формулировка задачи оптимального планирования работы НПЗ. Описана методика определения параметров при разработке модели завода в этих условиях, основанная на опыте выполнения таких проектов. Приведен пример модели НПЗ.

Ключевые слова: технологическая модель развития нефтеперерабатывающего завода, оптимизационные нелинейные модели, многопериодные модели.

Введение

В настоящее время задачи планирования производства, реконструкции и развития нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) обычно решаются методами моделирования и оптимизации [1, 2]. Планы развития НПЗ разрабатывают на основе моделирования производства с учетом потребности в продукции, возможности поставки сырья, состояния оборудования, затрат на реконструкцию, сроков строительства и других факторов [3]. Технологическая модель развития завода разрабатывается на основе базовой модели. Первый этап работы включает создание базовой модели завода, которая соответствует существующему состоянию завода. Затем разрабатываются варианты развития НПЗ, для расчёта которых разрабатываются модели вариантов развития. Результаты расчета каждого варианта развития сравниваются с результатами расчета по базовой модели в тех же сценарных условиях. Модель НПЗ разрабатывалась с помощью системы моделирования и оптимизации RPMS [4, 5].

При моделировании реконструкции и развития НПЗ наиболее трудоемкой частью работы является обследование предприятия, сбор данных о фактической работе завода и разработка базовой модели НПЗ на основе собранных данных. Базовая модель описывает текущее состояние завода в сложившихся условиях: по количеству и качеству получаемых нефтепродуктов, по качеству и объему перерабатываемого сырья. Эти результаты

расчета по базовой модели сравниваются с фактическими результатами работы завода за год и, таким образом, определяется достоверность модели.

Кроме того, при необходимости базовая модель позволяет также рассчитать технологические возможности завода по переработке сырья и производству продукции при изменении качества сырья, объема переработки и изменении нормативов по качеству продукции. По результатам такого расчета достоверность базовой модели проверяется экспертно по количеству товарных нефтепродуктов.

Базовая модель завода включает подмодели установок, данные о составе и свойствах нефти, подмодели смешения нефтепродуктов и подмодели объектов общезаводского хозяйства (ОЗХ). Обычно для идентификации параметров подмоделей берутся отчетные данные за один год, в том числе данные об исследовании поступающей нефти и качестве нефтепродуктов. Эти данные достаточны для оценки параметров подмоделей установок, смесей и моделирования качества нефти. При таком способе идентификации параметров базовой модели сравнение расчетного баланса завода по модели с фактическим балансом за год является дополнительной проверкой достоверности модели. Однако на ряде заводов средней производительности и мини заводах исследование нефти регулярно не производится и необходимо разработать модель по неполным данным.

Математическая формулировка модели оптимального планирования работы НПЗ

Модель завода включает подмодели всех технологических процессов завода, качество сырья, данные технологической схемы, требования к качеству товарных продуктов, цены на сырье, продукты, энергоносители и вспомогательные материалы. Формулировка модели оптимального планирования работы НПЗ, приведенная ниже основана на работах [3, 6].

Модель оптимального планирования НПЗ формулируется как модель многопериодной оптимизации на p периодов:

$$F = \sum_{t=1}^p \sum_{j=1}^n C_j^t x_j^t \quad F \rightarrow \max \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ijr}^t x_j^t = b_i^t \quad t = 1, \dots, p, \quad i = 1, \dots, m, \quad x_j^t \geq 0 \quad (2)$$

$$\frac{d_j}{\bar{d}_j} \leq \sum_{t=1}^p x_j^t \leq \bar{d}_j, \quad j \in J^0 \quad (3)$$

$$y_w^{t+1} = y_w^t + \sum_{j \in J_k^+} x_j^t - \sum_{j \in J_k^-} x_j^t, \quad 0 \leq y_w^t \leq S_w, \quad t = 1, \dots, p,$$

$$w = 1, \dots, W \quad (4)$$

$$a_{ijr}^t = f_j(q_{ijr-1}^t), \quad (5)$$

$$q_{ijr-1}^t = \varphi_j(x_{1r-1}^t, x_{2r-1}^t, \dots, x_{n-1}^t) \quad (6)$$

Здесь F — прибыль; x_{jr}^t — переменные задачи: материальные потоки сырья установок, продуктов или энергоносителей в период t ; y_w^t — запасы продуктов к концу периода t ; r — шаг вычислительного процесса (рекурсии), состоящий в решении задачи (1–4); a_{ijr}^t — коэффициенты матрицы $A^{tr}\{a_{ijr}^t\}$; c_j^t — цены, b_i^t , \bar{d}_j , \bar{a}_j — коэффициенты ограничений; S_w — объем резервуара для продукта (максимальный запас) в весовых единицах в любом периоде; J_w^+ — множество потоков пополняющих запас; J_w^- — множество потоков расходующих запас; J^0 — множество общих ограничений на весь горизонт планирования T . Длительность τ_t периодов t может быть различной, весь горизонт планирования фиксирован

$$T = \sum_{t=1}^p \tau_t.$$

Часть коэффициентов матрицы a_{ijr}^t являются постоянными величинами, а другие определены соотношениями (5, 6). Модель линейного программирования (ЛП) (1–4) может быть многопериодной, но также может включать только один период ($p=1$).

Задача ЛП (1–4) решается при заданных начальных значениях величин q_{ij0}^t и коэффициентов матрицы. После решения задачи ЛП (1–4) те коэффициенты матрицы a_{ijr}^t , которые определены зависимостями (5, 6), пересчитываются на каждом шаге r вычислительного процесса.

Величины q_{ijr-1}^t по физическому смыслу это, как правило, показатели качества сырья установок, продуктов установок или показатели качества компонентов смесей, которые определяются на шаге $r-1$ в зависимости от переменных x_{jr-1}^t . Функции $f_{ij}(q_{ijr-1}^t)$ это заданные нелинейные функции или линейные зависимости. Функции $\varphi_j(x_{1r-1}^t, x_{2r-1}^t, \dots, x_{n-1}^t)$ это заданные нелинейные функции, определяющие расчет соответствующих показателей качества нефтепродуктов. При первом решении задачи (1–4) $r=1$ начальные значения показателей q_{ij0}^t заданы.

Задача (1–6) по существу является нелинейной со значительным числом переменных, которые входят в нелинейные зависимости. Ограничения (2) становятся нелинейными при подстановке зависимостей (5) в (2). Форма записи задачи (1–6) предполагает решение методом последовательного моделирования и оптимизации, который рассматривается как вариант последовательного ЛП (ПЛП) [6–8]. В результате моделирования (5, 6) определяются параметры линейаризованной модели (1–4), а затем решается задача линейного программирования (1–4). После получения решения задачи ЛП проверяется точность моделирования путем сравнения значений параметров: q_{ijr-1}^t и q_{ijr}^t , а также коэффициентов матрицы a_{ijr}^t , которые пересчитываются. Этот процесс рекурсивно повторяется до получения заданной точности моделирования и линейаризации. Данные модели НПЗ приведены в качестве примера в следующем разделе.

Разработка и тестирование базовой модели в условиях неполной информации

На ряде заводов средней производительности и мини заводах исследование нефти регулярно не производится ввиду того, что поступает разное нефтяное сырье от разных поставщиков, постоянное исследование всего нефтяного сырья для таких заводов дорого и также требует больших трудозатрат в лаборатории. В этих случаях нефть анализируют примерно один раз в год, а также при начале добычи на месторождении или в начале поставки на завод. Такие данные исследований нефтяного сырья являются недостаточно представительными, поскольку нет данных по отклонениям качества сырья от среднего.

Регулярно не анализируют также такие показатели качества товарных нефтепродуктов, которые заведомо выполняются. Например, в мазуте определяется содержание серы при переработке такого сырья, в котором

Таблица 1. Сложность оптимизационной модели.

Переменных задачи ЛП	631
Ограничений задачи ЛП	445
Ненулевых элементов матрицы	2902

содержание серы в мазуте будет близко к максимальному. Поэтому по таким показателям качества нефтепродуктов нет возможности определить средние значения за год и идентифицировать параметры модели смешения, однако эти показатели смесей могут иметь существенное значение для расчета технологической схемы развития производства.

В таких случаях необходимо проверить достоверность базовой модели по имеющимся неполным данным. При таких условиях сравнение расчетного баланса завода по модели с фактическим балансом за год будет основным способом для проверки достоверности модели. Ниже кратко излагается методика разработки базовой модели завода и анализа достоверности, которая опробована при разработке базовой модели НПЗ, перерабатывающего до 8 видов нефтяного сырья разного качества: нефти, газового конденсата и газойля.

Разработка базовой модели после обследования завода и сбора данных включает следующие работы по моделированию:

1. Моделирование выхода продуктов первичной переработки нефти и качества этих продуктов основывается на имеющихся исследованиях нефти. Подмодели первичной переработки нефти строятся отдельно для каждого вида сырья и каждого режима переработки (обычно режимов переработки два — с получением авиа керосина или без авиа керосина). Для каждого сырья выход фракций бензина, керосина и дизтоплива берется по имеющимся анализам. Показатели качества фракций нефтепродуктов, которые не измерялись при исследовании данной нефти, берутся по соответствующим аналогам.
2. Разработка подмоделей установок вторичной переработки: риформинга, гидроочисток дизтоплива и других строится на основе плановых нормативов и фактических балансов установок за год. Производительности всех установок берутся по проекту, а также по достигнутым и утвержденным показателям.
3. Энергозатраты всех установок берутся на основе плановых нормативов и проверяются по результатам расчета модели всего завода.

4. Подмодели смешения товарных нефтепродуктов строятся на основе фактических данных, полученных при обследовании, и аналогов по данным других подобных производств [9].
5. По результату расчета общей модели завода корректируется общее производство мазута только в том случае, если отклонение по количеству мазута превышает допустимое значение (до 5%). После этого по балансу переработки каждого нефтяного сырья корректируется содержание серы в мазуте так, чтобы в модели первичной переработки нефти соблюдался баланс по содержанию серы отдельно для каждого вида сырья.
6. По результату расчета общей модели завода корректируется возможное общее содержание газов в нефтяном сырье в равной мере для всех видов нефтяного сырья. Такой подход связан с тем, что на содержание растворенных газов в различной нефти влияют общие факторы — условия транспортировки, сроки хранения сырья в резервуарах, температура воздуха и другие.

Число переменных и ограничений, характеризующее сложность оптимизационной модели НПЗ, приведено в следующей таблице.

После выполнения перечисленных выше расчетов и корректировке данных базовая модель НПЗ рассчитывается при ограничении на производство некоторых видов продуктов в соответствии с фактическим количеством, которое было произведено за этот год. Для этого в таком расчете ограничивается производимое количество, например, по одной марке каждого топлива, оставляя без ограничений количество не менее чем по одной марки каждого вида топлива (бензина, керосин и дизтоплива). Результаты такого расчета по базовой модели по производству всех видов товарных нефтепродуктов и по загрузке установок сравниваются с фактическими результатами работы завода за год. Таким образом, определяется достоверность модели по количеству всех произведенных товарных нефтепродуктов и загрузке установок.

В результате расчета базовой модели определяется качество сырья установок и качество товарных продук-

тов при переработке годового количества сырья. Это будет расчетное качество сырья установок и нефтепродуктов среднее за год.

Расчет качества сырья вторичных процессов и товарных продуктов является дополнительной проверкой достоверности модели. Для этого расчетные данные сравниваются с фактическими данными анализа качества. При этом сравнении учитываем, что сырье поступает на завод неравномерно. Например, в один месяц может поступить нефть с максимальным содержанием серы, а в другой месяц с минимальным.

По этой причине проводится несколько расчетов базовой модели НПЗ при переработке части годового сырья. Например, проводим расчеты при переработке сырья завода с максимальным содержанием серы и расчет при переработке сырья с минимальным содержанием серы; а также рассчитываем два других варианта по качеству сырья завода — с максимальным содержанием бензиновых фракций и с минимальным содержанием этих фракций. Сравниваем расчетные показатели качества с измеренными значениями. Цель сравнения — определить расчетные значения по модели противоречат фактическим значениям или не противоречат. Сравнение проводилось по таким показателям: содержание фракций до 70 гр.С и до 100

гр.С в бензине, содержание серы в сырье гидроочи-сток дизтоплива и бензина, содержание серы в мазуте и общее количество получаемой серы. Если расчетные значения качества согласуются с фактическими значениями, то это рассматривается как подтверждение достоверности модели. Таким образом, проверялась достоверность модели по расчету некоторых показателей качества сырья установок. Такая проверка подтвердила достоверность базовой модели завода. По разработанной базовой модели были также рассчитаны технологические возможности завода при увеличении объема переработки такого же нефтяного сырья и максимальной загрузке установок без изменения нормативов по качеству продукции. На основе базовой модели были разработаны модели ряда вариантов реконструкции. Расчет по описанной методике был выполнен для этапов реконструкции НПЗ и позволил учесть все требования к этапам реконструкции.

Заключение

Описанная методика определения параметров при построении модели позволяет разрабатывать оптимизационные модели для выбора вариантов реконструкции и развития мини заводов и средних НПЗ в случае неполных данных по качеству перспективной нефти или качеству сырья установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шишорин Ю.Р., Цодиков Ю. М., Мостовой Н. В., Кузнецов К. В., Маргу Д. В. Комплексный компании Honeywell к разработке долгосрочных программ развития перерабатывающих предприятий вертикально-интегрированных компаний. — М.: Автоматизация в промышленности, 2015 № 4 — С. 53–60.
2. Coxhead R.E. Integrated Planning and Scheduling Systems for the Refining Industry // Optimization in industry. Mathematical Programming and Modeling Techniques in Practice. Ed. Ciriani T. A., Leachman R. C. J. — Wiley&Sons, 1994. — P. 185–199.
3. Цодиков Ю. М., Хохлов А. С. Нелинейные модели оптимального планирования работы нефтеперерабатывающего завода // Тр. VII Московская международная конференция по исследованию операций (ORM2013) / ВЦ РАН. — М., 2013. — Т. 2 С. 54–56.
4. Цодиков Ю.М., Хохлов А. С., Шишорин Ю. Р., Мостовой Н. В. Анализ достоверности базовой модели развития нефтеперерабатывающего завода по неполным данным // Труды 7-й между. Конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2013). Т.1 — М.: Институт проблем управления, 2013, С. 127–128.
5. Refinery and Petrochemical Modeling System (RPMS). WWW.honeywell.com, 2018 г.
6. Дудников Е.Е., Цодиков Ю. М. Типовые задачи оперативного управления непрерывным производством. М.: Энергия, 1979. — 272 С.
7. Соркин Л. Р. Современные технологии управления в нефтегазовом комплексе. — М.: МФТИ, 2003. — 104 С.
8. Zang J., Kim N., Lasdon L. An improved successive linear programming algorithm // Management Science. — 1985, Vol. 31, N10, P. 1312–1331.
9. Цодиков Ю.М., Мостовой Н. И., Едигарова В. С. Расчет вязкости топочного мазута в моделях оптимального планирования. — М.: Химия и технология топлив и масел, 2009 № 2 — С. 44–46.

© Цодиков Юлий Моисеевич (tsodikov@ipu.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»