

$$\begin{array}{llll}
0,1c_1^{(n)} & -0,9c_2^{(n)} & +r_2 & +r_4 + r_5 + r_6 & \geq 0; \\
0,1c_1^{(n)} & -0,7c_3^{(n)} & & +2r_5 + 4r_6 & \geq 0; \\
& 0,1c_2^{(n)} & -0,9c_3^{(n)} & +r_5 + r_7 & \geq 0; \\
0,1c_1^{(n)} + 0,2c_2^{(n)} & -0,8c_4^{(n)} & & +2r_7 & \geq 0;
\end{array}$$

$$c_2^{(n)} + dc_2^{(n-1)} \geq 0;$$

$$c_3^{(n)} - s_1 + dc_3^{(n-1)} \geq 0;$$

$$0,1s_1 - d \geq 1;$$

$$c_1^{(n)} \geq 0, c_2^{(n)} \geq 0, c_3^{(n)} \geq 0, c_4^{(n)} \geq 0, r_1 \geq 0; r_2 \geq 0; r_3 \geq 0; r_4 \geq 0;$$

$$r_5 \geq 0; r_6 \geq 0; r_7 \geq 0;$$

В качестве нулевого приближения были взяты $c_2^{(0)} = 1$, $c_3^{(0)} = 1$. Полученные результаты расчетов по итерации представим в виде таблицы.

Таблица

Итерация	Оценки												
	c_1	c_2	c_3	c_4	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7	s_1	d
1-я	0,15	1,1	0,1	0,3	0	1,04	0	0	0	0	0	-1,0	-1,1
2-я	0,15	1,09	0,12	0,29	0	1,03	0	0	0	0	0	0	-1,0

x_1^1	x_1^2	x_2^1	x_2^2	x_3^1	x_3^2	x_4^1	y_1	y_2	D
0	40,6	100	0	0	26,4	25,0	88,3	9,7	98,1

Результаты расчетов по 3-й итерации совпали с результатами 2-й итерации.

Первые четыре оценки относятся к продуктам, следующие семь оценок — к производственным мощностям, а последние две отражают структуру спроса.

После определения оптимальных цен была определена оптимальная программа производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. М. Дудкин. Оптимальный материальный баланс народного хозяйства, М., «Экономика», 1966.
2. В. В. Коссов. Межотраслевой баланс. М., «Экономика», 1966.
3. В. С. Дадаля. Экономические расчеты по модели расширенного воспроизводства. М., «Экономика», 1966.

Поступила в редакцию
27 XI 1967.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ЗАВОДА ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В. П. ГОРЕНБУРГ, А. Н. ДАВЫДОВ, В. Л. КЛИМЕНКО,
Е. Б. ЦЫРКИН

(Ленинград)

В результате сложившейся практики проектирования нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) в качестве основных исходных данных принимают два показателя, в принципе противоречивых. С одной стороны, задаются типовой мощностью завода (6, 12, 18 и т. д. млн. т в год), с другой стороны, фиксируется ассортимент и количество нефтепродуктов исходя из потребности зоны (экономического района), в которой намечено строительство предприятия.

Противоречие заключается в том, что для удовлетворения потребности зоны в нефтепродуктах заданного ассортимента не обязательно строить НПЗ мощностью, скажем, 12 млн. т, а нужна мощность большая или меньшая. В то же время фиксирован-

ная типовая мощность НПЗ может либо не удовлетворить потребности зоны в нефтепродуктах, либо значительно ее превысить.

Далее, выбор тех или иных установок, включенных в схему завода, производится зачастую без достаточного технико-экономического обоснования. В настоящее время в отечественной промышленности существует свыше 60 типовых установок по различным процессам нефтепереработки, отличающихся мощностью, типом используемого сырья и ассортиментом получающихся продуктов, а также технико-экономическими показателями. Большое число установок определяет наличие большого числа вариантов схемы НПЗ. Однако вследствие трудоемкости расчетов обычно при проектировании рассматривают не более 2—3 вариантов.

К объективным трудностям добавляются субъективные. Ознакомление с выполненными в 1964—1966 гг. проектами типового НПЗ показывает, что включение некоторых установок и процессов в схему будущего завода в значительной мере зависит от того, какая организация занимается его проектированием.

Объективный анализ показателей всех технически осуществимых схем НПЗ при проектировании возможен лишь с применением экономико-математических методов. В отечественной литературе подробно освещены вопросы оптимального планирования производственной программы НПЗ [1—3]. Что же касается оптимального проектирования НПЗ, то в этом направлении сделаны лишь первые шаги [4].

Разумеется, модели оптимального планирования производственной программы и оптимального проектирования имеют в общем сходную структуру, так как они описывают один и тот же объект. Однако постановка проектной задачи принципиально отличается от задач оптимального планирования и, следовательно, требует специального математического описания. Ниже предложена общая модель для расчета проектной схемы нефтеперерабатывающего завода.

Задача ставится следующим образом. Даны ресурсы по сырью (нефть, газовый конденсат, водород и т. д.) и задание по выработке товарных нефтепродуктов. Известны также набор технологических установок, данные об их проектных мощностях, материальные балансы этих установок в зависимости от режима работы и характеристики перерабатываемого сырья. Необходимо определить структуру завода, обеспечивающую выпуск нефтепродуктов в соответствии с заданием, при учете ограничений по качеству, плану и т. д. и при минимуме приведенных затрат.

Нефтеперерабатывающий завод можно представить в виде двух блоков: блока переработки сырья и полупродуктов и блока смешения полупродуктов для получения товарных продуктов (рисунок). Будем считать, что все полупродукты блока I представляют компоненты товарных продуктов. В этом случае, если блоком I вырабатывается товарный продукт, то в блоке II он условно смешивается сам собой. Введем множество M для блока I

$$M = \{m_{ikc}\}.$$

Элементами этого множества являются определенные технологические процессы, реализованные на установке фиксированной мощности при фиксированных режимах с заданным распределением входа и выхода. Первый индекс элементов m характеризует один из процессов * (каталитический крекинг, каталитический риформинг, алкилирование и т. д.). Второй индекс — мощность установки по входу (по перерабатываемому сырью), третий — вариант работы установки в зависимости от ее технологического режима и перерабатываемого сырья. Так, различными вариантами будут, например, работа установки 35-11/300 на фракции 85—180° и на фракции 105—180°.

Обозначим вектор сырья и полупродуктов, вырабатываемых или получаемых любой из установок множества M , через P_{ikc} , а проекцию этого вектора, имеющую смысл количества сырья или s -го полупродукта, получаемого (потребляемого) на ikc -й установке, через a_{ikcs} . Если продукт потребляется, то $a_{ikcs} \leq 0$; если продукт вырабатывается, то $a_{ikcs} \geq 0$. Тогда $P_{ikc} = a_{ikc1}, a_{ikc2}, \dots, a_{ikcs}, \dots, a_{ikcm}$. Здесь первые три индекса компонентов векторов обозначают установку, а четвертый — порядковый номер сырья или продукта, поглощенного или произведенного данной установкой. Сырье и полупродукты нумеруются от 1 до m по порядку.

Введение индекса, пробегающего множество всех видов сырья и полупродуктов НПЗ, приводит к увеличению размерности задачи. Это связано с тем, что для каждой установки составляется баланс по всем полупродуктам. Тем не менее введение этого индекса необходимо, так как полупродукты не являются однозначной функцией уста-

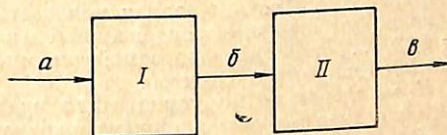


Схема нефтеперерабатывающего завода: I — блок переработки; II — блок смешения; а — сырье; б — полупродукты; в — товарные продукты

* Разными будем считать процессы, протекающие при резко отличных физических условиях. Например, каталитический риформинг обычного и жесткого режимов — различные процессы.

новки: одинаковые полупродукты могут быть выработаны на различных установках, а также получены со стороны. Пусть U_s — количество s -го сырья или полупродукта, поступающего со стороны, причем

$$U_s \leq Q_s, \quad U_s \geq 0, \quad s = 1, 2, \dots, m, \quad (1)$$

где Q_s — верхняя граница по s -му сырию.

Введем основное неизвестное для блока переработки — x_{ikc} , обозначающее количество установок i -го процесса, k -й мощности, работающих по варианту c . Тогда производство (поглощение) s -го полупродукта (сырья) блоком I можно записать в виде

$$U_s + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{l_i} \sum_{c=1}^{t_{ik}} \alpha_{ikcs} x_{ikc} \geq W_s, \quad (2)$$

где t_{ik} — количество вариантов i -го режима на установке k -й мощности; l_i — набор установок различных мощностей для i -го процесса; n — количество различных процессов; W_s — задание по s -му продукту для блока I . То же можно записать в векторной форме

$$\bar{U} + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{l_i} \sum_{c=1}^{t_{ik}} \bar{P}_{ikc} x_{ikc} \geq \bar{W}. \quad (3)$$

Первый член уравнения (3) отражает поступление сырья (полупродуктов) на НПЗ со стороны, второй — либо поглощение сырья, либо производство (поглощение) полупродуктов установками. Вектор $\bar{W}$ будет стоять только в промежуточном уравнении, описывающем блок переработки. При совместном решении систем уравнений блоков I и II этот вектор исключится. Если s -й полупродукт (сырье) полностью поглощается в блоке I , то $W_s = 0$. Если поступающее на НПЗ сырье направляется на компаундирование, минуя блок I , то $W_s = \bar{U}_s$.

Перейдем к описанию блока компаундирования нефтепродуктов. Обозначим задание по t -му товарному продукту через σ_t , тогда вектор товарных продуктов $\bar{\sigma} = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_t, \dots, \sigma_f)$, где $1, 2, \dots, t, \dots, f$ — нумерация товарных продуктов от 1 до f включительно. Множество товарных продуктов будем обозначать Φ , т. е. $\Phi = \{1, 2, \dots, f\}$. Пусть основная неизвестная компаундирования Y_{st} обозначает количество полупродукта s , содержащегося в товарном продукте t при $s = 1, 2, \dots, m$ и $t = 1, 2, \dots, f$. Введем два семейства множеств индексов: R_t — для полупродуктов и T_s — для товарных продуктов.

$R_t = s$, если s -е полупродукты входят в товарный продукт t ; $t = 1, 2, \dots, f$, $T_s = t$, если t -е товарные продукты включают в себя полупродукт s , $s = 1, 2, \dots, m$.

Уравнение ресурсов для блока компаундирования можно записать

$$\sum_{t \in T_s} Y_{st} = W_s, \quad s = 1, 2, \dots, m. \quad (4)$$

Ограничение по выпуску товарных продуктов определяется планом их производства

$$\sum_{s \in R_t} Y_{st} \geq \sigma_t, \quad t = 1, 2, \dots, f. \quad (5)$$

Каждый товарный продукт должен обладать определенными качественными характеристиками в соответствии с ГОСТ или техническими условиями. Пусть имеется набор качественных характеристик t -го товарного продукта $l_{t\alpha} = l_{t1}, l_{t2}, \dots, l_{tq}$, где $l_{t\alpha}$ обозначает ограничения по α -му качеству, которым должен обладать товарный продукт t .

Как правило, основные нормируемые качества товарных продуктов, получаемых смешением, являются аддитивным свойством их компонентов. Введем $O_{s\alpha}$ — численное значение качества, которым обладает s -й полупродукт, где $\alpha = 1, 2, \dots, q$. Тогда ограничение по качеству примет вид

$$\sum_{s \in R_t} Y_{st} (O_{s\alpha} - l_{t\alpha}) \geq 0, \quad (6)$$

$$t = 1, 2, \dots, f; \quad \alpha = 1, 2, \dots, q.$$

При совместной работе блоков I и II в уравнениях (2) и (4) равны правые части,

поэтому, подставляя в уравнение (4) значение W_s , получим

$$U_s + \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{k=1}^{k=l_i} \sum_{c=1}^{c=t_{ik}} \alpha_{ikcs} x_{ikc} - \sum_{t \in T_s} Y_{st} \geq 0, \quad s = 1, 2, \dots, m. \quad (7)$$

Одно из основных требований, предъявляемых к проектируемым НПЗ, — достижение заданной глубины отбора светлых нефтепродуктов. Пусть L — подмножество индексов светлых товарных продуктов, т. е. $L \subset \Phi$. Тогда условие того, что выход светлых будет не ниже заданной величины λ , запишется

$$\sum_{t \in L} \sum_{s \in R_t} Y_{st} \geq \lambda \sum_{t=1}^{t=f} \sum_{s \in R_t} Y_{st}. \quad (8)$$

Выбор оптимальной технологической схемы (набор $ikc = x$ технологических установок) производится по критерию: минимум приведенных затрат на строительство и эксплуатацию НПЗ

$$f = \sum_{s=1}^{s=m} U_s C_s + \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{k=1}^{k=l_i} \sum_{c=1}^{c=t_{ik}} Z_{ikc} x_{ikc} \quad \text{при } \min f, \quad (9)$$

где C_s — цена s -го сырья, Z_{ikc} — приведенные затраты по ikc -й установке.

Таким образом, совместная оптимальная работа блоков НПЗ описывается системой линейных уравнений (1), (5)–(9). Для ее решения необходимы следующие исходные данные: векторы $\bar{U}$, $\bar{\sigma}$, $\bar{P}_{111}, \dots, \bar{P}_{ikc}, \dots$; $\bar{O}_1, \dots, \bar{O}_m$; $\bar{l}_1, \dots, \bar{l}_f$; $\bar{c}_1$; $\bar{Z}$, множества индексов $R_1, \dots, R_f$; $T_1, \dots, T_m$; Φ , L и глубина отбора светлых λ . Отметим, что в приведенной модели x_{ikc} принимает целочисленные значения.

Для оценки возможностей численного решения модели нужно знать размер матрицы. Он подсчитывается по формулам

$$a = m' + m'' + \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{k=1}^{k=l_i} t_{ik} + \sum_{t=1}^{t=f} (\rho_{Rt} + \delta_t) + f' + 1, \quad (10)$$

$$b = m + m'' + \sum_{t=1}^{t=f} \delta_t + f' + 1, \quad (11)$$

где a — число неизвестных, включая дополнительные переменные, преобразующие неравенства (1), (5), (6), (8) в равенства; b — число уравнений; m — количество видов полупродуктов и сырья; m' — количество видов сырья, поступающего на завод со стороны; m'' — число ограничений по ресурсам поступающего сырья; t_{ik} — количество вариантов i -го режима на установке k -й мощности; l_i — набор установок различных мощностей для i -го процесса; ρ_{Rt} — количество элементов индексов множества R_t ; δ_t — количество ограничений по качеству t -го товарного продукта; f' — количество ограничений по выпуску товарных продуктов.

Предлагаемая модель является достаточно общей. Предварительное изучение показало, что она может быть применена практически во всех случаях конкретного проектирования современных НПЗ. Самым большим ограничением общности модели является требование аддитивности качественных показателей. Однако современное состояние вычислительных методов математического программирования, а также уровень знаний о качественных показателях нефтепродуктов таковы, что в настоящее время невозможно отказаться от этого ограничения.

Как известно, метод Гомори, несмотря на его теоретическую конечность, требует для достижения оптимального плана очень большого числа итераций. Порядком числа итераций даже при применении последних модификаций этого метода равен примерно 10^3 для задач относительно небольшой размерности [5]. Естественным и наиболее простым выходом из этого положения является применение симплекс-метода (с отходом от целочисленности) с округлением полученного решения до ближайших целочисленных значений неизвестных.

Практика показывает, что в этом случае можно получать достаточно хорошие решения. Так, нами решался ряд практических задач по определению оптимальной проектной структуры НПЗ, причем полученные решения по технико-экономическим

Таблица 1

**Набор основных технологических установок, включенных в схему НПЗ
по различным вариантам расчета**

Вариант расчета	Прямая перегонка		Каталитический рифформинг на облагораживание		Каталитический рефор- минг на ароматику		Гидроочистка		Термиче- ский крекинг
	A-12/5	AT-6	Л-35-11-300 (обычный режим)	Л-35-11-600 (обычный режим)	ЛГ-35-8-300Б (на фрак- ции 62—85° С)	ЛГ-35-8-300Б (на фрак- ции 62—120° С)	Л-24-6	Л-24-7	15-5
По утверж- денному проектному заданию	1	1	1	1	—	1	1	—	1
По расчету на ЭВМ	1	1	1	1	1	—	—	1	1

Таблица 2

**Основные технико-экономические показатели технологических схем НПЗ
по разным вариантам расчета**

Вариант расчета	Глубина отбора светлых, %	Капиталовло- жения (стоимость строительства установок), тыс. руб.	Затраты на обра- ботку, тыс. руб.	Стоимость сырья (нефти), тыс. руб.	Приве- денные затраты, тыс. руб.	Прибыль в расчете на весь объем производст- ва, тыс. руб.	Прибыль на 1 т перерабо- танной нефти, руб.
По утверж- денному проектному заданию	42,9	29 442	23 028	168 000	196 917	53 038	6,63
По расчету на ЭВМ	42,9	28 478	20 207	168 026	193 928	56 828	7,00

показателям превосходили проектные варианты, разработанные опытными проектировщиками.

В качестве примера приведем сопоставление результатов решения задачи на ЭВМ с вариантом, предложенным проектировщиками для одного из заводов (табл. 1, 2). В обоих вариантах ассортимент и количество используемой нефти одинаковы.

Из данных табл. 1, 2 следует, что вариант, рассчитанный по предлагаемой модели, обеспечивает снижение приведенных затрат на 3 млн. руб. по сравнению с запроектированным.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Б. Мандель. Экономико-математические модели внутризаводского текущего планирования в нефтепереработке. В сб. Математические методы в экономике и планировании. М., 1965, № 3. ЦЭМИ АН СССР.
2. Методика оптимального текущего внутризаводского планирования в нефтеперерабатывающей промышленности (с применением экономико-математических методов и электронных вычислительных машин). М., 1966, ЦЭМИ АН СССР.
3. М. Ю. Розенфайн. Линейная модель оптимального технико-экономического планирования нефтеперерабатывающего завода. Нефтепереработка и нефтехимия, 1966, № 3.
4. Е. И. Наумов, М. Ю. Розенфайн. Оптимальное проектирование технологической схемы нефтеперерабатывающего завода. М., 1966. (М-во нефтеперерабатывающей и нефтехим. пром-сти СССР. Центр. н.-и. ин-т техн.-эконом. исследований нефтеперерабатывающей и нефтехим. пром-сти).
5. Ю. И. Волков, В. И. Хохлюк. Методы решения целочисленных задач линейного программирования. В сб. Математические модели и методы оптимального планирования, Новосибирск, «Наука», Сиб. отд., 1966.

Поступила в редакцию
21 IX 1967