

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУР РАЗДЕЛЕНИЯ НЕФТИ НА ЦЕЛЕВЫЕ ПРОДУКТЫ НА ОСНОВЕ СВОЙСТВ УЗКИХ ФРАКЦИЙ

А.П. Сизиков

Самарский государственный экономический университет
113043, г. Самара, ул. Советской Армии, 141

В статье рассматривается задача разгонки нефти на целевые продукты с учетом эффекта нечеткого разделения. В качестве исходных данных используется таблица физико-химических свойств узких фракций. Для решения задачи применяется метод динамического программирования. Методика реализована в авторском программном продукте.

Ключевые слова: *ректификация нефти, температурные границы разделения, эффект нечеткого разделения, динамическое программирование.*

Для нефтеперерабатывающих предприятий весьма актуальным является выполнение требований стандартов серии ISO 9000 по обеспечению максимальной идентифицируемости, наблюдаемости и управляемости производства. Обеспечение этих требований в отношении процесса ректификации является сложной проблемой, поскольку здесь мы имеем дело с нефтью, которая представляет собой сложную физико-химическую систему. Экономический смысл проблемы заключается в том, чтобы по возможности избежать избыточного запаса целевых продуктов по качеству или, иначе говоря, убыточного перераспределения фракций в пользу малоценных продуктов.

Математическая формулировка задачи. При первичной переработке нефти происходит разделение смеси с непрерывным фракционным составом на ряд целевых продуктов. Состав смеси (нефти) предполагается известным в виде суммарной характеристики, называемой кривой истинных температур кипения (ИТК) и показывающей зависимость между температурой и процентом отгоняемой массы. Эта кривая представлена в виде нарезки узких фракций с температурами выкипания $[t_i, t_i + \Delta t_i]$, $i = 1, 2, \dots, L$, где L – число узких фракций. Информация об узких фракциях и их свойствах представляется в табличном виде (табл. 1).

Таблица 1

Фрагмент таблицы фракционного состава нефти и физико-химических свойств узких фракций

Фракция	Выход, %	Плотность	Вязкость	Сера	T 50%	T всп.
100-120	2,5	743,0	0,70	0,034	115	-6
120-130	1,5	752,2	0,78	0,041	125	15
130-140	1,5	760,1	0,89	0,048	135	22
140-150	1,5	768,1	1,02	0,075	145	29
150-160	1,5	775,9	1,14	0,102	155	38
160-170	1,5	783,7	1,27	0,128	165	43
170-180	1,5	791,1	1,39	0,155	175	50
560+	19,2	1 006,0	–	3,71	–	–

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

При разделении смеси необходимо учитывать следующие условия: материальный баланс, спецификацию целевых продуктов, эффект наложения фракций [1]. Задача сводится к задаче «о точках на прямой» и решается методом динамического программирования. Точками здесь являются температурные границы целевых продуктов или, точнее говоря, номера узких фракций, по которым осуществляется разделение. Математическая формулировка задачи:

$$\max_x \left\{ \sum_{n=0}^N f_n(x_n, x_{n+1}) \mid 0 = x_0 \leq x_1 \leq \dots \leq x_N = L \right\}, \quad (1)$$

где N – число целевых продуктов; x_n – начальная фракция n -го целевого продукта; $f_n(x_n, x_{n+1})$ – свертка векторного критерия, характеризующего целевой продукт с точки зрения ценности и соответствия спецификации.

Свертка векторного критерия состоит из двух составляющих. Первая учитывает ценность соответствующего целевого продукта; вторая – степень его соответствия спецификации:

$$f_n(x_n, x_{n+1}) = c_n \widehat{g}_n(x_n, x_{n+1}) - \beta_n \psi_n(x_n, x_{n+1}), \quad (2)$$

где c_n – реальная или «тенева» цена продукта; \widehat{g}_n – масса продукта в процентах к массе нефти; ψ_n – штрафная составляющая; β_n – коэффициент свертки, с помощью которого задается соотношение между составляющими критерия.

Пусть g_i – массовая доля i -той узкой фракции в нефти, тогда

$$\widehat{g}_n(x_n, x_{n+1}) = \sum_{i=x_n}^{x_{n+1}} g_i. \quad (3)$$

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:

$$\psi_n(x_n, x_{n+1}) = \sum_{k=1}^K \xi_{nk} \delta_{nk}^2(x_n, x_{n+1}), \quad (4)$$

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

$$\delta_{nk}(x_n, x_{n+1}) = \begin{cases} (p_{nk} - p_{nk}^+) / p_{nk}^+, & \text{если } p_{nk} > p_{nk}^+, \\ (p_{nk} - p_{nk}^-) / p_{nk}^-, & \text{если } p_{nk} < p_{nk}^-, \\ 0, & \text{если } p_{nk} \in [p_{nk}^-, p_{nk}^+], \end{cases} \quad (5)$$

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

$$p_{nk}(x_n, x_{n+1}) = I_k^{-1}(p_{nk}^I(x_n, x_{n+1})), \quad (6)$$

где $p_{nk}^I(x_n, x_{n+1})$ – так называемый индекс показателя, определяемый через индексы соответствующего показателя объединяемых продуктом узких фракций по аддитивной формуле

$$p_{nk}^I(x_n, x_{n+1}) = \sum_{i=x_n}^{x_{n+1}} \rho_{ik}^I g_i \hat{g}_n^{-1}, \quad (7)$$

где $\rho_{ik}^I = I_k(\rho_{ik})$ – индекс показателя ρ_{ik} узкой фракции; I, I^{-1} – прямая и обратная индексные функции. Индексные функции некоторых показателей качества представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Индексные функции показателей

Показатель	Прямая и обратная индексные функции
Вязкость V	$I : -(41.11 - 49.08 * \lg(\lg(V + 0.8)))$ $I^{-1} : 10^{(10^{((41.11 + I^V)/49.08)}) - 0.8}$
Температура вспышки T_B	$I : -10^{(42.1 + \lg((T_B + 460)^{-14.3}))}$ $I^{-1} : 10^{((42.1 - \lg(I_B^T))/14.3) - 460}$
Температура помутнения T_{II}	$I : (0.0026415 * (T_{II} + 460))^{20}$ $I^{-1} : (I_{II}^T)^{0.05/0.0026415} - 460$
Температура застывания T_3	$I : E^{-73.09 * (T_3 + 460)^{12.89}}$ $I^{-1} : E^{((73.09 + \ln(I_3^T))/12.89) - 460}$

Учет эффекта наложения фракций. Формулы (3) и (7) не учитывают, что разделение нефти на целевые продукты происходит нечетко, т. е. в каждый продукт попадают фракции из смежных разделов. Для учета этого эффекта использовались модифицированные формулы, полученные в предположении, что каждый продукт формируется из всего спектра узких фракций, взятых с некоторыми весовыми коэффициентами:

$$\hat{g}_n = \sum_{i=x_n}^{x_{n+1}} \left(\sum_{j=1}^L \mu_{ij} g_j \right), \quad (8)$$

$$p_{nk}^I = \sum_{i=x_n}^{x_{n+1}} \left(\sum_{j=1}^L \mu_{ij} \rho_{jk}^I g_j \right) \cdot \hat{g}_n^{-1}, \quad k = 1, 2, \dots, K, \quad (9)$$

где μ_{ij} – весовой коэффициент, зависящий от расстояния между фракциями, $|i - j|$.

В качестве рабочей гипотезы принято, что весовой коэффициент убывает в геометрической прогрессии от $|i - j|$. Тогда из условия, что сумма членов прогрессии равна единице, получается:

$$\mu_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если } |i - j| > m, \\ \frac{1 - q}{2(1 - q^m)q^{|i-j|}}, & \text{если } |i - j| \leq m, \end{cases} \quad (10)$$

где q – знаменатель прогрессии; m – число членов прогрессии, равное предельному расстоянию d для всех фракций, кроме крайних (начальных и конечных), для которых

$$m = \begin{cases} i, & \text{если } i < d, j < i, \\ L-i, & \text{если } i > L-d, j > i. \end{cases} \quad (11)$$

Параметры q , d определяются экспериментально по критерию

$$Q = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \left(\frac{P_{nk} - \bar{p}_{nk}}{P_{nk}} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (12)$$

где Q – сумма квадратов относительных отклонений экспериментальных \bar{p} значений показателей качества целевых продуктов от прогнозных p .

Приведенные ниже таблицы показывают, как учет эффекта наложения фракций влияет на расчетные значения характеристик целевых продуктов. В табл. 3 представлены результаты расчета Q на базе трех показателей: плотности, вязкости, серы. Для показателей продуктов приведены экспериментальные и теоретические значения, а также величины относительных отклонений (относительные погрешности). В последнем столбце – суммы квадратов относительных отклонений и итоговый результат Q . Теоретические значения, представленные в таблице, вычислялись без учета эффекта наложения фракций по формуле (7).

Таблица 3

Таблица сравнения расчетных и теоретических значений показателей

Показатель		Температуры разделения продуктов, °С				СКО
		180-270	270-300	300-330	330-360	
Плотность, $кг/м^3$	Эксп.	818,0	845,5	859,0	878,0	0,0004
	Теор.	825,1	855,5	870,1	882,6	
	Откл.	0,009	0,012	0,013	0,005	
Вязкость при 20 °С, $мм^2/с$	Эксп.	2,3	5,5	9,6	19,2	0,1042
	Теор.	2,6	6,7	11,2	21,3	
	Откл.	0,130	0,218	0,167	0,109	
Сера, % массы	Эксп.	0,704	1,141	1,469	1,704	0,0105
	Теор.	0,723	1,250	1,451	1,671	
	Откл.	0,027	0,096	-0,012	-0,019	
Q						0,1151

Таблица 4

Поиск оптимальных значений параметров градиентным методом

№	q	d	Q	№	q	d	Q
1	5	2,00	0,1124	52	8	1,49	0,0533
2	6	1,99	0,0977	53	9	1,48	0,0502
3	7	1,98	0,0810	54	8	1,47	0,0533
4	8	1,97	0,0710	55	9	1,46	0,0502
5	9	1,96	0,0676	56	8	1,45	0,0533
6	8	1,95	0,0709	57	9	1,44	0,0502
7	9	1,94	0,0676	58	8	1,43	0,0533
9	8	1,93	0,0709	59	9	1,42	0,0502
9	9	1,92	0,0675	60	8	1,43	0,0533
10	8	1,91	0,0708	61	9	1,42	0,0502

Затем такие же расчеты были сделаны по формуле (9), т. е. с учетом эффекта наложения при различных значениях параметров q, d . Поиск оптимальных значений параметров, т. е. решение задачи (12), осуществлялся градиентным методом на сетке с шагом $\Delta q = 0,01, \Delta d = 1$ (табл. 4). Функция в окрестности оптимума является слабо выпуклой; можно говорить о существовании почти стационарной области. При $d = 8 \pm 1$ и $q = 1,4 \pm 0,2$ результаты практически одинаковы.

Алгоритм решения задачи. Для решения задачи (1) использован метод динамического программирования. Задача представлена как N -шаговый процесс принятия решений. Под состоянием процесса перед n -м шагом понимается начальная фракция текущего целевого продукта, $S_{n-1} = x_{n-1}$; под управлением – число включаемых в текущий продукт узких фракций: $u_n = x_n - x_{n-1}$. Тогда оператор перехода из текущего состояния в новое есть $S_n = \varphi_n(S_{n-1}, u_n) = x_{n-1} + u_n = x_n$. Под функцией шагового дохода следует понимать $f_n(S_{n-1}, u_n) = f_n(x_{n-1}, x_n)$. Рекуррентное уравнение Беллмана в данном случае выглядит так:

$$F_{n-1}(x_{n-1}) = \max \{ f_n(x_{n-1}, x_n) + F_n(x_n) \}, \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (13)$$

где F – функция состояния, $F_n(x_n) = 0$.

Алгоритм:

1. В области допустимых вариаций температурных границ строим сетевой направленный граф так, что множество его путей соответствует множеству допустимых решений задачи. Узлы группируются по уровням, соответствующим шагам процесса и образуют множества X_0, X_1, \dots, X_N , причем X_0 и X_N содержат по одному узлу.

2. Движемся от конца к началу так, что $n = N-1, N-2, \dots, 0$. На каждом шаге для всех $x_n \in X_n$ решаем задачу (13), в результате чего находим условно-оптимальное управление $\hat{u}_n(x_n)$ и потенциал $F_n(x_n)$.

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

$$\hat{x}_1 = \hat{u}_0(0) \rightarrow \hat{x}_2 = \hat{u}_1(\hat{x}_1) \rightarrow \dots \rightarrow \hat{x}_N = \hat{u}_{N-1}(\hat{x}_{N-1}). \quad (14)$$

4. Вычисляем значения температурных точек разделения и коэффициенты отборов целевых продуктов:

$$T_n = t_{\hat{x}_n}, \quad \hat{g}_n = \sum_{i=\hat{x}_n}^{\hat{x}_{n+1}} \left(\sum_{j=1}^L \mu_{ij} g_j \right), \quad n = 1, 2, \dots, N. \quad (15)$$

Заключение. Результатом работы является методика оптимизации технологического процесса ректификации нефти. Методика реализована в авторском программно-математическом продукте [2]. Он может использоваться как самостоятельно, так и в контуре системы более высокого уровня, например, в составе программы технико-экономического моделирования всего нефтеперерабатывающего завода [3].

Предложенная методика и программа позволяют заменить затратную и длительную методику ВНИИ НП. Длительность расчета и оценки потенциалов продуктов снижается более чем на порядок. Использование программы создает предпосылки для повышения оперативности управления первичной переработкой нефти и достижения оптимальности этого процесса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дудников Е.Е., Цодиков Ю.М. Типовые задачи управления непрерывным производством. – М.: Энергия, 1979.
2. Сизиков А.П. Повышение эффективности первичной переработки нефти: программный продукт PREDICT ASSAY// Известия Самар. науч. центра РАН. Спец. вып. «Актуальные проблемы экономики и права». – Май 2005.
3. Сизиков А.П. Программный продукт СМОННП (система оптимизации нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств). Управление большими системами // Сб. трудов. Вып. 24. – М.: ИПУ РАН, 2009.

Статья поступила в редакцию 8 декабря 2010 г.

UDC 681.3

METHOD OF CALCULATING THE TEMPERATURE SEPARATION OF OIL BASED ON THE PROPERTIES OF NARROW FRACTIONS

A.P. Sizikov

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

The article describes the problem of oil distillation to target products. The initial data tables used are physical and chemical properties of narrow fractions. To solve this problem we used the method of dynamic programming. The technique is implemented in software product.

Keywords: *distillation of oil, the points of separation, the effect of fuzzy separation, dynamic programming.*