

ПРОБЛЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ

Оптимизация температурного режима колонны K-102

Многокомпонентная ректификация нефти представляет собой процесс выделения испарением более простых веществ из сложного при нагреве его до соответствующих температур. Это непрерывное производство, дающее большое количество продукции и в настоящее время достаточно хорошо оснащенное контрольно-измерительной и регулирующей аппаратурой. Однако управление данным процессом в силу его вероятностного характера и большого количества взаимозависимых переменных — непростая задача. Обычно поиск оптимального режима ведется экспериментально и на него затрачивается от 20 до 60% времени работы установки на данном виде сырья, причем часто режим, найденный оператором установки, бывает неоптимальным с экономической точки зрения. Поэтому вопрос наилучшего управления этим производством весьма важен.

Упрощенная схема колонны K-102 изображена на рис. 1.

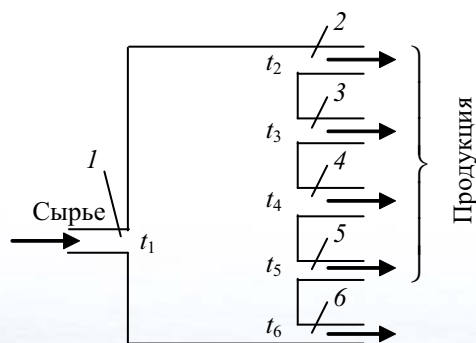


Рис. 1. Схема колонны K-102.

На вход поступает сырье при определенной температуре t_1 . Различная по высоте колонны температура t_2, t_3, t_4, t_5, t_6 обеспечивает ректификацию необходимых веществ на выходах 2, 3, 4, 5. Выход 6 служит для слива оставшегося вещества (мазут).

Изменение одной из температур влияет на остальные, но этот процесс достаточно инерционный, чтобы в некотором промежутке времени установку каждой температуры считать независимой.

Качество продукции зависит от правильно выбранного соотношения всех температур, и, как указывалось выше, это соотношение ищет оператор установки. В процессе работы из-за различных случайных возмущений требуется корректировка установленных значений температур.

Для данного объекта были определены следующие группы параметров.

1. Входные параметры. Это, во-первых, количество и качество сырья, являющегося в данном случае продуктом предыдущих звеньев технологической цепи завода. Сырьем для данной установки служит отбензиненная нефть.

Качество сырья — случайная величина. О составе сырья можно судить по анализам, представляющим собой данные о различных степенях испарения исследуемого вещества. Например, один из анализов сырья в условиях Мозырского НПЗ по фракционному составу по ГОСТ 2177-99, °С, % выхода (табл. 1).

По этим анализам можно судить о возможном количестве готового продукта, составляющем определенный процент от общего количества сырья. Если, допустим, задано производство фракции 180—230 °С, то теоретически из сырья приведенного состава его можно получить (при удачном температурном режиме) $31\% - 21\% = 10\%$.

Кроме того, такие «температурные» анализы позволяют оператору выбрать первый шаг для поиска необходимых значений $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$ в соответствии с той или иной температурой начала кипения.

В дальнейшем нам потребуется как-то обозначать тот или иной состав сырья, поэтому, чтобы не приводить весь

Таблица 1

Н.К.	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
50	5,5	9,0	12,5	17,0	21,0	24,0	28,5	33,0	37,5	42,0	46,0

громоздкий анализ, условимся в качестве отличительных признаков считать температуру начала кипения $t_{н.к.}$ и теоретически возможное количество основного (заданного) продукта. Как показало изучение статистического материала, эти два признака не всегда однозначно определяют друг друга, поэтому и приходится указывать их вместе.

II. Управляющие параметры. Требуемый ход исследуемого технологического процесса обеспечивается знанием шести управляющих температур $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$. Для контроля и регулировки этих величин существует соответствующая аппаратура (за исключением t_6 , которая не имеет регулятора). Как уже говорилось, изменение всех этих температур взаимозависимо.

Помимо всех вышеназванных параметров, на колонну К-102 действует целый ряд неконтролируемых случайных возмущений, таких как климатические (внешние) условия (сильный мороз или сильная жара делают установку неуправляемой), изменения в оборудовании и т.п. Но наиболее «обычным» случайным фактором, характерным для исследуемого объекта, является изменение в составе сырья, происшедшее в неконтролируемый период.

Влияние всех этих случайных возмущений сказывается на форме закона распределения управляющих параметров.

III. Выходные параметры \bar{Y} . Характеризуются экономическими показателями, количеством и качеством готовой продукции. Готовая продукция — это различные фракции, получаемые с выходов 2, 3, 4, 5 (рис. 1), причем для некоторых видов сырья только один продукт является «товарным», качество которого имеет существенное значение. Все остальные могут поступать на вторичную обработку. Например, основным продуктом является фракция 180—230 °С. В подобных случаях требование получать со всех выходов доброкачественную продукцию нецелесообразно и иногда практически невыполнимо. Поэтому задачей оптимизации является определение наилучшего температурного режима лишь для ректификации товарной продукции. Если практически возможно получать продукцию допустимого качества со всех выходов, то и задачу оптимизации следует формулировать с учетом этих обстоятельств.

О качестве продукции можно судить по анализам, по форме аналогичным анализам сырья. Например, анализ фракции 180—230 °С:

- Н. к.....160 °С;
- 10%.....193 °С;
- 50%.....213 °С;
- 90%.....234 °С;
- К. к.....240 °С.

Сведения об экономических параметрах — это в основном те сведения, которые требуются для расчета себестоимости продукции.

Изучение статистических данных по всем перечисленным группам параметров дает возможность составить требуемое математическое описание, по которому можно будет установить вид уравнения оптимизации и его коэффициенты. Изучение процесса удобно проводить по этапам.

1-й этап. Наблюдаемые (в пределах технологического допуска) составы сырья можно разбить по «полосам качества». Это разбиение необходимо производить таким образом, чтобы случайные колебания состава сырья внутри такого интервала практически не сказывались на качестве продукции при неизменном температурном режиме. Отличительным признаком каждой полосы качества считаем температуры начала кипения ($t_{н.к.}$) и теоретически возможные количества продукта.

Этот прием замены непрерывного процесса дискретным позволяет упростить изучение поведения объекта. Кроме того, сужение диапазона случайных изменений состава сырья снижает влияние этого фактора на закон распределения управляющих параметров $f(T)$.

Естественно, чем мельче величины интервалов, тем точнее описание процесса, но при этом оно становится более громоздким. Необходимо находить компромиссное решение, учитывая, что процесс сужения интервалов, начиная с некоторого количества полос, перестает существенно влиять на точность решения.

2-й этап. Для каждой полосы качества сырья по статистическим данным выявляются соответствующие распределения температур $f(t)$, совокупностью которых определяется температурный режим установки. Другими словами, для каждого состава сырья определяется область возможных значений управляющих параметров, ограниченная шестимерным законом распределения температур $f(T)$.

3-й этап. На основании сведений о выходных параметрах производится разбиение всего пространства управляющих температур на ряд областей, соответствующих различным сортам продукции и браку.

Экономические показатели дают возможность произвести «оценку» каждой такой области. В результате получаем скалярные поля цен, на которых необходимо найти оптимальное расположение $f(T)$.

Приведем некоторые предварительные выводы статистического исследования процесса дистилляции при работе установки по получению основного продукта фракции 180—230 °С.

1. Исходным материалом для составления статистического описания служат данные, собранные при наблюдении за работой действующего объекта. В результате соответствующих исследований выявлены основные переменные, от которых зависит процесс, причем существует возможность регулирования большинства из них.

2. Значения каждой из температур $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$ можно считать подчиненными нормальному закону распределения. Определение параметров законов распределения и соответствующая проверка гипотезы о правильности выбранного закона производится с помощью известных методов математической статистики.

3. Степень линейной взаимозависимости t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 учитывается коэффициентом корреляции.

Оптимизация первичной переработки нефти с максимальным отбором светлых продуктов и использованием ИТК нефти

Анализ известных систем управления процессом ППН показал, что используемые в них методы управления неэффективны при высокочастотных возмущениях по качеству нефти, так как используемые при этом модели и принципы управления ориентированы на восстановление кривой истинных температур кипения (ИТК) нефти по результатам ректификации или при помощи лабораторного контроля. Для этого требуется не менее 5 ч, что приводит к снижению оперативности управления. При частых изменениях качества нефти это вызывает существенные потери светлых продуктов.

В рассматриваемой системе для обеспечения оперативности управления может быть предусмотрено восстановление кривой ИТК нефти по косвенным показателям (плотности d_4^{20} , температуре застывания t_3 , вязкости v_{20}).

Для установления зависимости между этими показателями и ИТК в условиях ОАО «Мозырский НПЗ» были использованы данные лабораторных анализов о процентах выкипания при различных температурах разгонки нефти (табл. 2).

$$Y_1 = -1351.1709 + 1.6245X_1 - 1.0549X_2 - 0.8861X_3$$

$$Y_2 = -729.0468 + 0.8650X_1 - 0.0422X_2 - 0.0354X_3$$

$$Y_3 = 4160.2190 - 4.8101X_1 - 0.2532X_2 - 0.2127X_3$$

$$Y_4 = 13393.3431 - 15.5696X_1 + 0.7595X_2 - 0.8620X_3$$

Значения указанных косвенных показателей используются для расчета точек кривой ИТК нефти, при этом восстановление качества нефти требует не более 1 ч, что позволяет существенно улучшить оперативность управления. Расчетные точки кривой ИТК далее используются при идентификации структуры математических моделей процесса.

Таким образом, эквивалентная замена кривой ИТК нефти d_4^{20}, t_3 и v_{20} позволяет осуществлять оперативный контроль изменения качества сырья, а следовательно, повышать эффективность управления процессом ППН при высокочастотных возмущениях по качеству нефти.

Для идентификации параметров моделей процесса по данным пассивного эксперимента могут быть применены алгоритмы смещенного оценивания (СО), основной идеей которого является отказ от традиционного требования регрессионного анализа — требования несмещенности, т.е. для смещенных

оценок $\hat{\beta}^* = \varphi(k, \beta)$ и $M(\hat{\beta}^*) \neq \beta$. При этом $M(\hat{\beta}^* - \beta)' \cdot (\hat{\beta}^* - \beta) < M(\hat{\beta} - \beta)' \cdot (\hat{\beta} - \beta)$,

где $\hat{\beta}$ — МНК-оценка;

β — вектор истинных параметров регрессии;

Таблица 2

N	d_4^{20} , кг/м ³ (X_1)	v_{20} , сСт	t_3 , °C	% выкипания при температурах, °C			
				н.к., (Y_1)	140, (Y_2)	230, (Y_3)	300, (Y_4)
1	859,1	15,62	-17	43	14,0	27,5	44,0
2	859,1	13,94	-15	43	14,0	27,5	41,0
3	859,4	14,96	-23	49,5	14,5	27,5	44,0
4	859,0	13,57	-17	45	14,0	28,5	44,0

После обработки данных с помощью аппарата множественной регрессии были получены уравнения регрессии, имеющие высокие коэффициенты множественной корреляции (в линейном варианте).

k — параметр деформации;
 M — символ математического ожидания. Это существенно уменьшает влияние коррелированности входов и повышает надежность идентификации параметров регрессионных моделей.

$$\gamma_{0i}^* = K_j \gamma_{ij} + \gamma_{0i},$$

При решении задачи оптимизации учитываются обратные связи, возникающие при использовании подогрева нефти отводимыми потоками. Необходимость такого подхода обуславливается тем, что колебания температуры сырья на выходе теплообменников сильно влияют на режим работы колонны отбензинивания К-101 и сложной колонны К-102.

Основная задача сводится к максимизации отбора светлых продуктов и формулируется как

$$y = \sum_{i \in I_c} \left(\sum_{j=1}^{p_i} \beta_{ij} u_j + \sum_{j=1}^{q_i} \gamma_{ij} K_j \right) \rightarrow \max, \quad (1)$$

при

$$u_j \leq \bar{u}_j, \quad u_j \in \bar{P}_{am},$$

$$\underline{Z}_s \leq Z_s(\bar{P}_{am}, \bar{K}_H) \leq \bar{Z}_s, \quad S = \bar{1}, \bar{k}_c,$$

где

I_c — множество светлых продуктов (бензин, керосин и дизельное топливо);

p_i и q_i — соответственно количество управляющих воздействий и показателей качества нефти в модели;

u_j — управляющие воздействия (температуры 1-го и 2-го перетоков из К-102 в стриппинги, температуры левого и правого потоков на выходе из печи П-101, температуры низа и верха К-102), на которые накладываются позиционные ограничения;

K_j — показатели качества нефти;

β_{ij} и γ_{ij} — коэффициенты регрессии;

Z_s — показатели качества светлых продуктов (температуры начала и конца кипения, вспышки и застывания), которые имеют вид регрессионных моделей;

\bar{P}_{am} — вектор режима атмосферной части установки ППН;

\bar{K}_H — вектор показателей качества нефти;

k_c — количество показателей качества светлых продуктов.

Благодаря использованию линейного описания процесса для решения задачи оптимизации оказалось возможным использовать метод линейного программирования (ЛП). Когда в модели, используемой в задаче оптимизации, имеется показатель качества нефти, его текущее значение умножается на соответствующий коэффициент и результат суммируется со свободным членом, т. е. корректируется свободный член модели:

где γ_{0i} — свободный член уравнения регрессии без учета качества нефти. Затем формируется массив ограничений и решается задача оптимизации.

Оптимизация процесса первичной переработки нефти по критерию общей стоимости полученных продуктов

Рассматривается задача оптимального разделения нефти применительно к разделению непрерывной смеси на ряд целевых нефтепродуктов разной значимости x_i имеющих стоимость c_i . На показатели качества каждого нефтепродукта заданы ограничения, которые сведены к ограничениям на фракционный состав. В пределах заданных ограничений распределение узких фракций между целевыми продуктами неоднозначно, поэтому среди возможных надо выбрать такое распределение, которое максимизирует заданный критерий.

Состав нефти предполагался известным в виде ИТК нефти, причем определение характеристики ИТК проводилось путем суммирования характеристик нефтепродуктов (рис. 2).

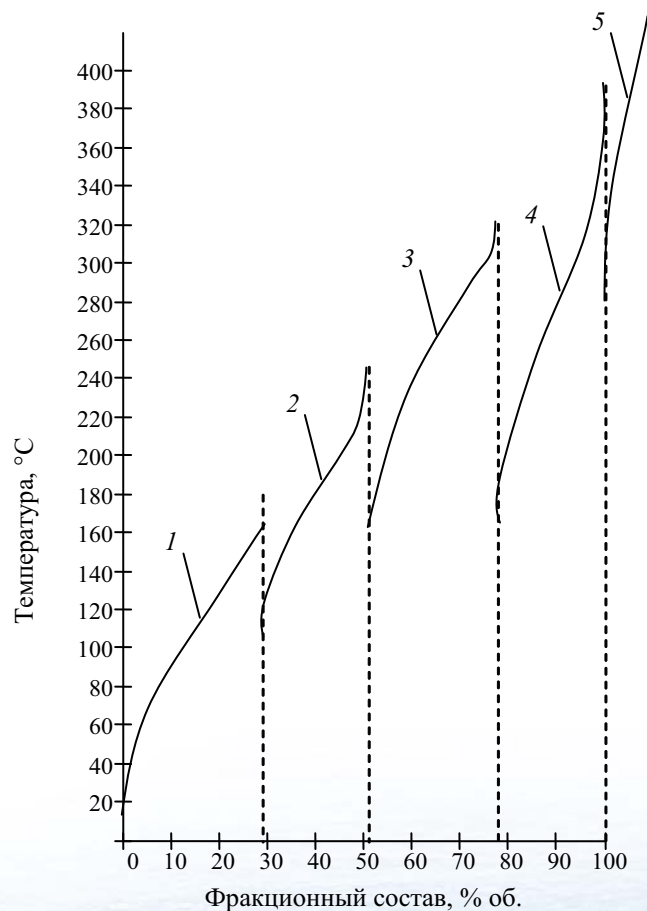


Рис. 2. ИТК нефтепродуктов: 1 — бензин, 2 — керосин; 3 — дизельное топливо легкое, 4 — дизельное топливо тяжелое; 5 — мазут.

Введем следующие обозначения:

ΔB_j — относительное объемное количество исходной смеси, отгоняемой между температурами t_j и t_{j-1} , при этом $t_0 = 0^\circ\text{C}$, $j = 1, 2, \dots, n$;

t — температура;

m — число получаемых продуктов;

n — число дискретных уровней температур в заданном интервале температур кипения смеси;

u_{ij} — объемное количество узкой фракции j , идущей в i -ый продукт;

\bar{u}_j — то же при перегонке без флегмы;

x_j — объемное количество продукта относительно исходной смеси.

В качестве критерия оптимизации примем экономический критерий — общую стоимость полученных продуктов:

$$Z = \sum_{i=1}^m c_i x_i \quad (2)$$

В модели разделения непрерывной смеси необходимо учитывать условия материального баланса по фракциям; ограничения на четкость разделения; ограничения на показатели качества продуктов.

Уравнения материального баланса должны выполняться по каждой узкой фракции с температурой выкипания от t_j до t_{j+1} , и по всем целевым продуктам, т.е.:

$$\Delta B_j = \sum_{i \in I_j} u_{ij}, \Delta B_k \geq \sum_{\substack{i \in I_k \\ k > 1}} u_{ik}, x_i = \sum_{i \in I_j} u_{ij}, \forall i, j, \quad (3)$$

где I_j — множество продуктов, содержащих j -ую узкую фракцию;

I_i — множество узких фракций, определяющих i -ый продукт. По некоторым фракциям вместо уравнений баланса вводят неравенства.

Работа установки первичной переработки нефти характеризуется достижимой четкостью разделения. Предельно достижимая четкость разделения продуктов $i, i+1$ определяется крутизной кривой фракционного состава продукта i в области конца кипения (или в области начала кипения продукта $i+1$), т.е. условием:

$$u_{ij+1} - u_{ij} \leq u_i^* x_i, \quad (4)$$

где u_i^* — коэффициент, определяемый по ИТК продукта.

Качество каждого нефтепродукта характеризуется его фракционным составом. Предполагается, что любой показатель качества можно определить в виде регрессионной зависимости от фракционного состава или от значений выхода (отгона) u_{ij} при заданных температурах t_j . Ограничения на показатели качества, как правило, односторонние, например:

$$\gamma_i^k (y_{ij}) \geq \gamma_{i0}^k, \quad (5)$$

где $y_{ij} = u_{ij} / x_i$ или $y_{ij} = \bar{u}_{ij} / x_i$; γ_i^k — k -тый показатель ГОСТа i -го продукта.

Величины $\Delta B_j, u_i^*$ — коэффициенты зависимостей типа (5) определяются по текущему допустимому режиму с установки — величине отбора x_i^* , ИТК и качественным показателям.

В результате предложенная модель (3)—(5) будет корректна только в окрестности допустимого режима:

$$x_i \in [0.8x_i^*, 1, 2x_i^*]. \quad (6)$$

Линеаризовав зависимость (5) в окрестности (6), получим, что задача разделения нефти сводится к задаче линейного программирования (ЛП).

Возможна вероятностная постановка задачи разделения нефти, учитывающая неточность зависимостей (5).

Варьируя числом ограничений (5), количеством целевых продуктов и коэффициентами целевой функции, можно анализировать различные варианты работы установок первичной переработки.

В процессе эксплуатации установки первичной переработки нефти приведенные критерии оптимизации могут изменяться в зависимости от постановки задачи оптимизации. Поэтому каждый из рассматриваемых методов оптимизации может быть применен с учетом специфических особенностей процесса.