

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РЕКТИФИКАЦИИ НЕФТИ В КОЛОННЕ К-102 ПО МАКСИМУМУ ВЫХОДА СВЕТЛЫХ НЕФТЕПРОДУКТОВ

With the account of the most effective course of process of primary oil refining in column K-102 the criterion of optimization connected to the maximal output of light mineral oil is chosen. Mathematical statement of algorithm of the optimization, including necessary target and restrictive functions is developed, the necessary mathematical model of process of rectification of oil in column K-102 is received, the block diagram of algorithm of optimization on the basis of which the program of calculation of optimum operating modes of a column on the computer is developed is made. The received settlement optimum modes have confirmed efficiency of the developed algorithm of optimization.

Технологический процесс в атмосферной колонне можно представить в виде многомерного объекта, где выделены основные группы параметров, определяющие его течение и характеризующие состояние в любой момент времени.

Входные параметры x_i ($i = 1, \dots, n$), которые могут быть изменены и характеризующие количество и качество отбензиненной нефти, поступающей в атмосферную колонну: расход нефти (F); температура нефти (t_f); плотность нефти (ρ).

Управляющие параметры u_k ($k = 1, \dots, r$). Под управляющими понимают параметры, на которые можно оказывать прямое воздействие в соответствии с теми или иными требованиями. Они позволяют управлять процессом. Такими основными параметрами для колонны К-102 являются расход пара (F_n), расход острого орошения (F_o), расход верхнего циркуляционного орошения (ЦО) (S_1), расход 1-го ЦО (S_2), расход 2-го ЦО (S_3), давление в колонне (P), температура верха колонны (t_1), температура 1 ЦО в колонну (t_2), температура 2 ЦО в колонну (t_3), температура низа колонны (t_n).

1. Возмущающие воздействия ξ_g ($g = 1, \dots, e$). Возмущающими называют параметры, значения которых случайным образом изменяются с течением времени и которые недоступны для изменения также, как климатические условия (внешние), изменение в оборудовании, изменение состава нефти и режима теплообмена и др.

2. Выходные параметры y_j ($j = 1, \dots, m$). Под выходными понимают параметры, величины которых определяются режимом процесса и которые характеризуют его состояние, возникающее в результате суммарного воздействия входных, управляющих и возмущающих параметров. Выходные параметры характеризуются качеством продукции, получаемой в колонне К-102. К ним относятся расход фракции 140–180° (W_1), ее плотность (ρ_1); расход фракции 180–230° (W_2), ее плотность (ρ_2); расход фракции 230–360° (W_3); ее плотность (ρ_3); темпера-

тура 98% выкипания фракции 140–180° (T_1); температура 98% выкипания фракции 180–230° (T_2); температура 50% выкипания фракции 230–360° (T_3).

Для описания совокупностей входных управляющих и выходных параметров применяется следующая векторная форма записи:

$$\begin{aligned} X &= (F, T_f), \\ U &= (F_n, F_o, S_1, S_2, S_3, t_1, t_2, t_3, t_n), \\ Y &= (W_1, W_2, W_3, T_1, T_2, T_3), \end{aligned} \quad (1)$$

с учетом которой зависимость выходных параметров процесса от входных и управляющих можно записать в виде

$$Y = \varphi(X, U). \quad (2)$$

Величина φ также рассматривается как вектор-функция, поэтому

$$y_j = \varphi_j(X, U) \quad (j = 1, \dots, m). \quad (3)$$

Соотношение вида (3) является математической моделью оптимизируемого процесса.

Выбор критерия оптимизации обусловлен технологическими целями ведения процесса в колонне К-102. В первую очередь такой целью является более полное извлечение из нефти потенциала светлых нефтепродуктов. Возможный отбор суммы светлых нефтепродуктов зависит не только от качества нефти. Он является также функцией вырабатываемого ассортимента нефтепродуктов, так как для одновременного приготовления различных сортов керосина (фракция 140–230°С) и дизтоплива (фракция 180–360°С) требуется одна и та же фракция 180–230°С, при этом прямогонная фракция 140–230°С получается смешением вырабатываемых в колонне К-102 и стриппингах 103/1 и 103/2 фракций 140–180°С и 180–230°С, а прямогонная фракция 180–360°С – смешением дизельных фракций 180–230°С и 230–360°С, вырабатываемых соответственно в стриппингах 103/2

и 103/3. Поэтому увеличение выходов всех фракций увеличивает отбор суммы светлых нефтепродуктов. При этом с учетом плотности исходной нефти и плотностей получаемых фракций целесообразно максимизировать массовый расход всех фракций.

Степень выхода светлых нефтепродуктов определяется соотношением

$$K = \frac{W_1 \rho_1 + W_2 \rho_2 + W_3 \rho_3}{F \rho} \quad (4)$$

Таким образом, задача оптимизации статических режимов работы колонны К-102 сводится к достижению максимального значения степени выхода светлых нефтепродуктов (в соответствии с конкретной технологической ситуацией) при выполнении заданных ограничений на качественные показатели – температуры выкипания: 98% фракций 140–180°C (T_1) и 180–230°C (T_2), выкипания 50% фракции 230–360°C (T_3) и расходов всех фракций W_1, W_2, W_3 .

Кроме того, накладываются позиционные ограничения на все остальные управляющие воздействия U_k ($k=1, \dots, r$).

Математически постановка данной задачи оптимизации формулируется следующим образом:

$$\begin{aligned} K &\rightarrow \max. \\ \underline{W}_i &\leq W_i(X, U) \leq \overline{W}_i \quad (i=1, 2, 3), \\ T_j &= T_{j\text{зад}} \quad (j=1, 2, 3), \\ \underline{U}_i &\leq U_i \leq \overline{U}_i \quad (i=1, 2, \dots, 10). \end{aligned} \quad (5)$$

Черта внизу параметра (например, \underline{W}_i) означает его нижнее (минимальное) значение, черта сверху параметра (\overline{W}_i) – верхнее (максимальное) значение в диапазоне изменения данного параметра.

При этом величина ограничений на выходные переменные и управляющие воздействия может изменяться в соответствии с технологическими требованиями ведения процесса.

Решение задачи оптимизации в этом случае получается в виде зависимости управляющих параметров процесса U (кроме W_i) от входных параметров X и заданных значений расходов фракций W_i :

$$U_{opt} = U(X, W_i). \quad (6)$$

В соответствии с технологическими целями варианты работы колонны определяются используемыми видами сырья (нефть Западно-Сибирская (НЗС), нефть Республики Беларусь

(НРБ)) и их номенклатурой одновременно получаемых продуктов (бензиновая фракция, осветкеросин (ОК), реактивное топливо (РТ), дизельное топливо летнее (ДТЛ), дизельное топливо зимнее (ДТЗ).

При этом исследованы следующие варианты работы колонны:

1. Сырье – НЗС, продукты – Б – ОК – ДТЛ;
2. Сырье – НЗС, продукты – Б – РТ – ДТЛ;
3. Сырье – НЗС, продукты – Б – ОК – ДТЗ;
4. Сырье – НЗС, продукты – Б – РТ – ДТЗ;
5. Сырье – НРБ, продукты – Б – ОК – ДТЛ;
6. Сырье – НРБ, продукты – Б – РТ – ДТЛ.

Для каждого из вариантов работы колонны собраны необходимые статистические данные о технологических параметрах процесса в колонне, на основании которых разработаны адекватные математические модели и определены интервалы ограничений на параметры процессов, необходимые для реализации алгоритмов оптимизации для обоих режимов.

В качестве примера рассмотрим режим работы колонны при сырье – Западно-Сибирская нефть (ЗСН) и продуктах колонны – бензин, дизельное топливо летнее (ДТЛ), осветкеросин (ОК).

Чтобы получить математическую модель для данного режима работы колонны вида (3), использованы данные о технологических параметрах процесса, взятые из режимных листов за период июнь – август 2003 г. в количестве 124 опробований с интервалом 2 ч. При этом интервал времени между измерениями входных (в том числе и управляющих) и выходных параметров с учетом времени запаздывания принят равным 2 ч.

По этим данным для всех параметров процесса рассчитаны статистические характеристики: математическое ожидание (среднее значение) \bar{X}_i , дисперсия S_{xi} , среднее квадратическое отклонение σ_{xi} , коэффициент вариации V_{xi} , которые сведены в табл. 2, где также приведены минимальные (X_{\min}) и максимальные (X_{\max}) значения всех параметров в данной статистической выборке.

На первом этапе разработки статистической модели процесса в колонне необходимо выбрать вид (форму) уравнения регрессии. Так как параметры процесса многокомпонентной ректификации находятся в сложной нелинейной зависимости друг от друга, то целесообразно принять нелинейную форму регрессионной зависимости между данными параметрами. Ввиду значительного количества входных (X_i) и управляющих параметров (U_i) целесообразно применить параболическую зависимость 2-го порядка.

Для всех выходных параметров $Y_k(W_1, W_2, W_3)$ уравнение регрессии в общем виде принимает следующий вид:

$$Y_k = b_{i0} + b_{i1}F + b_{i2}F_0 + b_{i3}S_1 + b_{i4}S_2 + b_{i5}S_3 + b_{i6}F_P + b_{i7}P + b_{i8}t_1 + b_{i9}t_2 + b_{i10}t_3 + b_{i11}t_n + b_{i12}t_f + b_{i13}F^2 + b_{i14}F_0^2 + b_{i15}S_1^2 + b_{i16}S_2^2 + b_{i17}S_3^2 + b_{i18}F_P^2 + b_{i19}P^2 + b_{i20}t_1^2 + b_{i21}t_2^2 + b_{i22}t_3^2 + b_{i23}t_n^2 + b_{i24}t_f^2. \quad (5)$$

С учетом принятой формы уравнений регрессии (5) с использованием статистических данных о технологических параметрах процесса по методу наименьших квадратов для всех выходных параметров процесса Y_k были рассчитаны коэффициенты уравнений регрессии.

Оценка адекватности полученных уравнений проводилась по соотношению

$$F_P \geq F_T(g, f_1 / f_2), \quad (6)$$

где F_P – расчетный показатель (расчетное значение критерия Фишера); $F_T(g, f_1/f_2)$ – табличное значение критерия Фишера при уровне значимости $g = 0,05$ и числе степеней свободы $f_1 = N - n - 1$ и $f_2 = N - 1$.

$$F_P = \frac{S^2}{S_{\text{ост}}^2}, \quad (7)$$

где S^2 – дисперсия выходного параметра; $S_{\text{ост}}^2$ – остаточная дисперсия выходного параметра.

Расчитанные значения F_P для всех выходных параметров приведена в табл. 1.

Таблица 1

Выходной параметр	W_1	W_2	W_3
F_P	5,525	15,866	10,247

При проведении расчетных исследований по данному варианту алгоритма оптимизации и качестве интервала ограничений по каждому выходному параметру ($T_1, T_2, T_3, W_1, W_2, W_3$) и некоторым управляющим воздействиям (F, t_1, t_2, t_3, t_n), как наиболее реальные для данного диапазона изменения расхода отбензиненной нефти, можно принять ограничения по i -тому параметру в диапазоне

$$M(X_i) - \sigma_{X_i} \leq X_i \leq M(X_i) + \sigma_{X_i}, \quad (8)$$

где $M(X_i)$ – среднее значение параметра X_i , σ_{X_i} – среднее квадратическое отклонение X_i .

Величины $M(X_i)$ и σ_{X_i} для всех параметров процесса приведены в табл. 2.

Таблица 2

Обозначение параметра	Среднее значение параметра \bar{X}	Дисперсия параметра S_X^2	Среднее квадратическое отклонение σ_X	Коэффициент вариации V_X	Минимальное значение X_{\min}	Максимальное значение X_{\max}
F	876,0813	1384,3704	37,2071	0,0425	792,0000	949,0000
F_0	65,7317	103,0291	10,1503	0,1544	45,9000	80,0000
S_1	178,6748	798,8278	28,2635	0,1582	111,0000	208,0000
S_2	356,2033	799,4256	28,2741	0,0794	300,0000	397,0000
S_3	384,9512	478,2435	21,8688	0,0568	338,0000	410,0000
P	0,7914	0,0007	0,0258	0,0326	0,7300	0,8400
F_P	8,6182	0,4934	0,7025	0,0815	7,0800	9,9300
t_1	113,0894	1,0329	1,0163	0,0090	110,0000	116,0000
t_2	93,8382	22,7501	4,7697	0,0508	88,2000	110,0000
t_3	95,0642	7,8608	2,8037	0,0295	89,3000	104,0000
t_n	331,1707	9,4542	3,0748	0,0093	313,0000	337,0000
t_f	339,5203	11,8254	3,4388	0,0101	331,0000	346,0000
T_1	172,3415	16,8988	4,1108	0,0239	163,0000	178,0000
T_2	239,7073	59,7661	7,7309	0,0323	222,0000	256,0000
T_3	362,5854	28,5890	5,3469	0,0147	346,0000	374,0000
W_1	33,0714	135,2153	11,6282	0,3516	5,0600	45,6000
W_2	154,6992	29,6711	5,4471	0,0352	142,0000	160,0000
W_3	203,7967	417,3272	20,4286	0,1002	151,0000	249,0000

При определении интервала ограничений на такие управляющие воздействия, как расходы всех орошений (F_0, S_1, S_2, S_3), которые существенно влияют на результат расчетов, целесообразно принять следующее соотношение:

$$\bar{S}_i - \sigma_{S_i} \leq S_i \leq \bar{S}_i + \sigma_{S_i} \quad (i = 0, 1, 2, 3), \quad (9)$$

где \bar{S}_i – рассчитанное по уравнению регрессии вида

$$S_i = a_{i0} + a_{i1}F \quad (10)$$

значение соответствующего расхода i -того орошения при заданном расходе отбензиненной нефти F .

Коэффициенты a_{i0}, a_{i1} , рассчитанные для всех S_i , приведены в табл. 3

Таблица 3

Обозначение коэффициента	F_0	S_1	S_2	S_3	F_p
a_{i0}	127,8	-338,9	229,7	340,7	-0,4
a_{i1}	-0,07	0,59	0,144	0,051	0,01

Задача оптимизации процесса в колонне К-102, математически сформулированная в виде (5), а также с учетом нелинейных соотношений, определяющих ограничительные функции, может быть решена с применением наиболее эффективного в данных условиях метода нелинейного программирования.

Как правило, решения задач нелинейного программирования могут быть найдены только численными методами с применением ЭВМ.

В настоящее время для решения подобных задач разработано и применяется довольно значительное число методов. Это объясняется тем, что практически каждая конкретная задача оптимизации, сводящаяся к задаче нелинейного программирования, обладает присущими только ей особенностями, позволяющими с наибольшим успехом применить тот или иной метод решения. Выбор метода обусловлен сложностью вычисления критерия оптимальности и сложностью ограничивающих условий, необходимой точностью решения, мощностью ЭВМ, размерностью решаемой задачи и т. д.

Среди методов нелинейного программирования в практике оптимизации действующих промышленных установок нашли применение безградиентные методы. Из них наиболее простым, универсальным и эффективным является метод сканирования.

Метод сканирования заключается в последовательном просмотре значений критерия оптимальности в ряде точек, принадлежащих области изменения независимых переменных, и нахождения среди этих точек такой, в которой критерий оптимальности имеет максимальное значение.

Основное достоинство метода – при его использовании с достаточно густым расположением исследуемых точек всегда гарантируется отыскание глобального оптимума, так как анализируется вся область изменения независимых переменных; независимость поиска от всегда оптимизируемой функции.

Для произвольного числа независимых переменных цикл по каждой следующей переменной производится после того, как полностью завершён цикл по предыдущей.

Дополнительные ограничения на выходные параметры процесса (ограничительные функции), по существу, не усложняют процедуры использования метода сканирования, так как в этом случае точки, которые не удовлетворяют заданным условиям, просто исключаются из рассмотрения и значения функции в них не вычисляются. Наличие данных ограничений даже ускоряет решение задачи, поскольку возможный диапазон изменения переменных при этом сужается и значения ограничительных функций рассматриваются в меньшем числе точек.

Особенно процедура поиска оптимума упрощается, если ограничения заданы в виде неравенств (4), когда приемлемость точки решается простой проверкой этих условий.

Количество расчетов целевой функции при использовании этого метода возрастает в показательной зависимости от размерности решаемой задачи. Поэтому метод целесообразно применять для задач оптимизации невысокой размерности (7–10 варьируемых переменных) с учетом быстродействия ЭВМ.

Решение задачи оптимизации предполагается выполнить на современных быстродействующих персональных ЭВМ, поэтому применение метода сканирования вполне обосновано.

В соответствии с математической формулировкой задачи оптимизации (5) полученных уравнений математической модели процесса и выбранного метода оптимизации (одного из методов нелинейного программирования – метода сканирования) разработана блок-схема алгоритма оптимизации.

По блок-схеме алгоритма оптимизации в пакете Matlab составлена программа решения задачи оптимизации статических режимов работы колонны К-102. При проведении расчетных исследований по данному алгоритму существенное влияние на результаты расчетов оказывают заданные интервалы ограничений на некоторые выходные параметры и управляющие воздействия, которые можно изменять в соответствии с технологическими требованиями ведения процесса.

Из полученных данных видна возможность (при заданном качестве фракций T_1, T_2 и T_3) суммарного увеличения выхода фракций (W_1, W_2, W_3) на 1,5–2%, что показывает эффективность разработанного алгоритма.