

Ставиться завдання оптимального проектування системи ректифікаційних колон заданої топології, як задача дискретно-неперервного нелінійного програмування, для рішення якої пропонується метод гілок і границь

Ключові слова: система ректифікаційних колон, метод гілок і границь

Дается постановка задачи оптимального проектирования системы ректификационных колонн заданной топологии, как задачи дискретно-непрерывного нелинейного программирования, для решения которой предлагается метод ветвей и границ

Ключевые слова: система ректификационных колонн, метод ветвей и границ

We give a formulation of the problem of optimal design of a system of distillation columns of a given topology, as the problem of discrete-continuous nonlinear programming, whose solution is proposed branch and bound method

Keywords: a system of distillation columns, branch and bound method

О ПОДХОДЕ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ РЕКТИФИКАЦИОННЫХ КОЛОНН МЕТОДОМ ВЕТВЕЙ И ГРАНИЦ

Н. Н. Зиятдинов

Профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой*

Контактный тел.: (843) 231-41-94

E-mail: nnziat@yandex.ru

Н. Ю. Богула

Аспирант*

Контактный тел.: (843) 231-41-94

E-mail: nellybog@gmail.com

Г. М. Островский

Профессор, доктор технических наук*

E-mail: nnziat@yandex.ru

Контактный тел.: (843) 231-41-94

*Кафедра системотехники

Казанский государственный технологический университет

ул. Карла Маркса, 68, г. Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация, 420015

1. Введение

Ректификация – один из наиболее ресурсозатратных процессов, поскольку системы разделения являются высоко металло- и энергоемкими установками. При оптимальном проектировании необходимо найти компромиссное решение между капитальными затратами на установку – они зависят от числа ступеней разделения и потоков флегмы – и эксплуатационными затратами на ведение процесса – организацию паровых потоков, подогрев и охлаждение потоков. В качестве критерия оптимальности в таких случаях используют экономический критерий, включающий в себя и капитальные, и эксплуатационные затраты.

Данную проблему можно представить в виде двух задач. Первая задача - поиск оптимальной последовательности ректификационных колонн, минимизирующей затраты на разделение. Вторая - решение задачи оптимизации ректификационной установки с заданной топологией, минимизирующей приведенные затраты. В докладе рассматривается подход для решения второй задачи.

2. Подходы к решению задачи проектирования системы ректификационных колонн

Пусть задача оптимального проектирования поставлена следующим образом: заданы параметры мно-

гокомпонентного сырья, поступающего на разделение (расход, состав, температура, давление), топология проектируемой установки разделения, требования на качество целевых продуктов. Требуется спроектировать систему ректификационных колонн: определить число тарелок в каждой колонне, места ввода питания, режимы работы колонн, при которых критерий приведенных затрат принимает минимальное значение и выполняются ограничения на качество выпускаемой продукции.

Эта задача может быть решена с применением одного из двух подходов к расчету ректификационных колонн [1]:

1) упрощенные методы решения: расчет по уравнениям Фенске, Андервуда, Джиллиленда с использованием эмпирических коэффициентов (коэффициент избытка флегмы). Результаты неточные и не дают оптимального решения;

2) точные методы решения. Используется термодинамическая модель, включающая: уравнения общего и покомпонентного материальных балансов, теплового баланса, уравнения кинетики массопередачи, фазового равновесия и др. Обычно применяются методы потарелочного расчета или матричные методы.

Представим установку ректификации как единую систему, состоящую из N ректификационных колонн, для оптимального проектирования которой предлагается использование глобального подхода. В этом случае, задача проектирования сводится к дискретно-непрерывной оптимизации одновременно всей системы, в которой дискретными переменными являются число тарелок исчерпывающей и укрепляющей секций каждой колонны, а непрерывными переменными – режимные параметры.

Задача выбора оптимального числа тарелок в секциях ректификационной колонны с одновременной оптимизацией непрерывных переменных в системе сводится к решению следующей задачи:

$$f = \frac{\min}{x^j, u^j, m_s^j} \sum_{j=1}^N f^j(x^j, u^j, m_s^j) \tag{1}$$

$$\varphi_k^j(x^j, u^j, m_s^j), s = 1, 2, j = 1, \dots, N,$$

$$1 \leq m_s^j \leq m_s^{j, \max}, k = 1, \dots, m_s^{j, \max} \tag{2}$$

$$\psi^j(x^j, u^j) \leq 0, j = 1, \dots, N, \tag{3}$$

j – номер ректификационной колонны; x^j, u^j – переменные состояния и управляющие переменные в j -ой ректификационной колонне; s – номер укрепляющей ($s=1$) и исчерпывающей ($s=2$) секций колонн; m_s^j – число тарелок в укрепляющей или исчерпывающей секциях j -ой ректификационной колонны, которые в общем случае могут принимать любые целые значения в пределах от 1 до $m_s^{j, \max}$ соответственно; $m_s^{j, \max}$ – максимальное число тарелок в секциях колонн, задается на начальной итерации пользователем; $f^j(x^j, u^j, m_s^j)$ – суммарные капитальные и эксплуатационные затраты j -ой ректификационной колонны; уравнения (2) – математические модели укрепляющей и исчерпывающей секций j -ой ректификационной колонны; уравнения (3) – проектные ограничения j -ой ректификационной колонны. Для простоты дальнейшего изложения

в задаче (1) опущены уравнения связи, характеризующие топологию системы ректификационных колонн.

3. Оптимизация проектирования системы ректификационных колонн

Задача минимизации критерия оптимальности является задачей дискретно-непрерывного нелинейного программирования (ДННП), где режимные переменные – непрерывные, число тарелок в колоннах – дискретные поисковые переменные.

Очевидно, что в результате решения этой задачи мы также получим номер тарелки питания.

Известно, что одним из наиболее эффективных методов решения задачи ДННП является метод ветвей и границ. Метод ветвей и границ не является полностью формализованной процедурой. При применении этого метода для решения какого-либо класса задач необходимо разработать алгоритм получения верхней и нижней оценок и процедуры ветвления. При этом важнейшей задачей при разработке метода ветвей и границ для любого класса задач является разработка метода вычислений нижней оценки. Стандартной процедурой получения нижней оценки в задачах ДННП является переход от дискретных переменных к непрерывным, что превращает задачу получения нижней оценки в обычную задачу нелинейного программирования, имеющую хорошо разработанные методы решения. Этот общий подход здесь не может быть применен, поскольку число тарелок не может быть дробным. В связи с этим в докладе рассматривается новый подход к получению нижних оценок при решении задачи оптимального проектирования системы ректификационных колонн [2].

Рассмотрим уравнение математической модели j -й ректификационной колонны, связывающее равновесную y_{is}^{jk} и рабочую концентрацию y_{is}^{jk} i -го компонента в паровой фазе на k -ой тарелке s -ой части через η_{is}^{jk} – локальный эффективный коэффициент полезного действия тарелки:

$$y_{is}^{jk} = y_{is}^{j, k+1} + \eta_{is}^{jk} (y_{is}^{*jk} - y_{is}^{j, k+1}) \tag{4}$$

Введем переменные α_{sk}^j , где каждая α_{sk}^j соответствует k -й тарелке, s -ой части j -й колонны. С помощью новых переменных модифицируем уравнение (4):

$$y_{is}^{jk} = y_{is}^{j, k+1} + \alpha_{sk}^j \eta_{is}^{jk} (y_{is}^{*jk} - y_{is}^{j, k+1}) \tag{5}$$

Отметим, при $\alpha_{sk}^j = 0$ мы получаем, что $y_{is}^{jk} = y_{is}^{j, k+1}$, $x_{is}^{jk} = x_{is}^{j, k-1}$, то есть при $\alpha_{sk}^j = 0$ k -я тарелка отсутствует.

И, наоборот, при $\alpha_{sk}^j = 1$ тарелка присутствует. Используя новые переменные, мы можем сформулировать задачу оптимального проектирования как задачу поиска оптимальных значений переменных α_{sk}^j и режимных переменных.

Тогда задача (1) с новыми переменными запишется в виде:

$$f = \frac{\min}{x^j, u^j, \alpha_s^j} \sum_{j=1}^N f^j(x^j, u^j, \alpha_s^j) \tag{6}$$

$$\varphi^j(x^j, u^j, \alpha_s^j) = 0, \tag{7}$$

$$\psi^j(x^j, u^j) \leq 0, \quad j = 1, \dots, N, \tag{8}$$

$$\alpha_s^j = [0, 1],$$

где α_s^j - вектор, компонентами которого являются $\alpha_{sk}^j, k = 1, \dots, m_s^{j, \max}$.

Преимущества преобразования задачи 4 в задачу 6 позволит переходить от дискретных переменных к непрерывным, что позволит получать нижние оценки. Для решения используется метод ветвей и границ. Для получения нижней оценки используем непрерывные переменные α_{sk}^j . В этом состоит преимущество перехода от дискретных переменных – числа тарелок в колоннах к переменным α_{sk}^j .

Представим алгоритм поиска в виде дерева-графа.

Введем множества M_s^{jl} номеров тарелок в укрепляющей и исчерпывающей секциях j -ой колонны ($s = 1, 2$), где l – номер шага метода ветвей и границ. Эти множества определяются следующим образом: M_s^{jl} содержит номера тарелок, для которых α_{sk}^j принимают фиксированные значения 0 или 1. Эти значения определены на предыдущих итерациях метода ветвей и границ. Вопрос о наличии или отсутствии тарелок в колонне, номера которых не вошли в эти множества, должен быть решен на последующих шагах.

Каждой вершине будет соответствовать набор множества множества возможного числа тарелок соответствующих ректификационных колонн. Ветвление проводится по числу тарелок в каждом множестве, путем дробления выбранного на данной итерации множества на два подмножества. Нижняя оценка получается решением задачи, когда все множители α_{sk}^j в уравнении (5) непрерывны, варьируются. В результате решения получаем набор дробных α_{sk}^j . Верхняя оценка получается в результате решения задачи, когда в качестве числа тарелок взята целая часть суммы параметров α_{sk}^j , полученных при решении непрерывной задачи.

Принцип ветвления некоторой вершины осуществляется следующим образом. На каждом шаге проводится разбиение числа тарелок одной секции одной из колонн на 2 множества. В первом множестве s -ой секции j -ой колонны параметры α_{sk}^j в интервале $(1, \left\lfloor \frac{m_s^{jl}}{2} \right\rfloor)$ равны 1, все остальные α_{sk}^j в интервале $(\left\lfloor \frac{m_s^{jl}}{2} \right\rfloor + 1, m_s^{jl})$ варьируются; где m_s^{jl} – число тарелок, для которых $k \in M_s^{jl}$. Во втором множестве – параметры α_{sk}^j в интервале $(1, \left\lfloor \frac{m_s^{jl}}{2} \right\rfloor)$ варьируются, в интервале $(\left\lfloor \frac{m_s^{jl}}{2} \right\rfloor + 1, m_s^{jl})$ равны 0. На каждой итерации решаются задачи получения верхних и нижних оценок, в результате решения которых получаем нижнюю и верхнюю оценки, сравниваем их значения. Если на l -м шаге разность верхней и нижней оценок меньше заданной величины ϵ , найденное решение принимается оптимальным. В противном случае сравниваются нижние оценки, и в вершине с наименьшей нижней оценкой проводится ветвление. Поиск останавливается, когда в колоннах не осталось

нерассмотренных тарелок, или же когда нижняя и верхняя оценка близки с заданной точностью.

Пример проектирования системы ректификационных колонн был описан в [2].

Предложенный подход был использован для оптимального проектирования ректификационной колонны для разделения 4-компонентной смеси, содержащей пропан, н-бутан, изобутан, пентан.

Исходные данные: расход сырья, поступающего на разделение – 30000 кг/ч; состав сырья (массовые доли): пропан – 0,006; н-бутан – 0,171; изобутан – 0,0415; пентан – 0,408; температура сырья – 50°C; давление сырья – 450 кПа. Требования на качество продуктов: степень извлечения н-бутана в дистиллят $\geq 0,98$; степень извлечения пентана в кубовый продукт $\geq 0,99$. К.п.д. тарелок колонны был принят равным 1.

Давление верха было выбрано с учетом возможности конденсации верхних продуктов промышленной водой и равно 420 кПа, гидравлическое сопротивление колонны 30 кПа.

Требуется определить число тарелок в колонне, место ввода питания, режим работы колонны, при котором критерий приведенных затрат принимает минимальное значение и выполняются ограничения на качество выпускаемой продукции.

Начальное приближение числа тарелок для колонны было принято равным 30. В качестве поисковых переменных были приняты расход флегмы в колонне, переменные α_{sk}^j . Таким образом, общая размерность задачи вычисления нижней оценки была равна 31. Ограничения типа неравенств накладывались на качество выходных продуктов. Их число равно 2.

Расчеты проводились с применением моделирующей программы Hysys.

Ход решения задачи приведен в таблице 1. Решение было получено за 6 шагов (вершина 3_2). Представленные следующие за вершиной 3_2 результаты ветвления показывают, что найденная вершина действительно является оптимальной. Параметры оптимального режима: флегмовое число - 0,97, температура куба – 86°C.

Таблица 1

Ход решения задачи

№ вершины*	Колонна 1				Нижняя оценка	Верхняя оценка
	Сумма α УЧ	Число тарелок УЧ**	Сумма α ИЧ	Число тарелок ИЧ**		
1_1	11,49	11	7,49	7	263757	267766
1_2	3,99	4	7,49	7	558351	422700
2_1	9,39	9	9,39	9	259732	260695
2_2	11,49	11	3,99	4	325643	367740
3_1	12,3	12	8,7	9	262798	262445
3_2	8,79	9	9,39	9	259775	260369
4_1	12	12	12	12	263347	263412
4_2	13,04	13	9,39	9	259505	264584
5_1	14	14	12	12	269153	269181
5_2	12	12	12	12	263340	263265

* – первая цифра – номер итерации, вторая цифра – номер потомка;
 ** – число тарелок, которые присутствуют; УЧ – укрепляющая часть; ИЧ – исчерпывающая часть

Литература

1. Комисаров Ю.А., Гордеев Л.С., Вент Д.П. Научные основы процессов ректификации: Т.2. Учебное пособие для вузов / Под ред. Серафимова Л.А. М.: Химия, 2004.
2. Островский Г.М., Зиятдинов Н.Н., Лаптева Т.В., Богула Н.Ю. Оптимальное проектирование системы ректификационных колонн // ДАН. 2010. Т. 431. № 6.

У статті представлений метод використання індексів для оцінки екологічної безпеки техногенних об'єктів на різних етапах життєвого циклу. Представлено результати для техногенних об'єктів

Ключові слова: техногенний об'єкт, екологічний ризик, індекс

В статье представлен метод использования индексов для оценки экологической безопасности техногенных объектов на разных этапах жизненного цикла. Представлены результаты для техногенных объектов

Ключевые слова: техногенный объект, экологический риск, индекс

In the article, the methodology of index usage is presented for the estimation of ecological safety of technical objects on the different stages of life cycle. Results are presented for technical objects

Keywords: technical object, ecological risk, index

УДК 502.3+504.064

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНДЕКСНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Т. В. Бойко

Кандидат технических наук, доцент
Кафедра кибернетики химико-технологических
процессов
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»
пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056
Контактный тел.: (044) 454-9-137
E-mail: tvbojko@gmail.com

1. Введение

Развитие общества на современном этапе все более сталкивается с проблемами обеспечения безопасности и защиты человека и окружающей природной среды. Следствием все больше возрастающего антропогенного влияния на окружающую природную среду и интенсификации использования природных ресурсов, но не всегда рационального и без соблюдения надлежащих мероприятий техногенной безопасности, во многих странах мира проявляется стойкая тенденция к росту количества промышленных аварий и разрушительных стихийных явлений.

Стратегия устойчивого развития общества предполагает оценку безопасности промышленных предприятий с целью предотвращения возможных аварий

и минимизации вреда для окружающей природной среды и человека в случае их возникновения.

Подготовка комплексных решений для согласования противоречивых условий экономического развития и безопасного функционирования промышленных объектов представляет собой необходимую предпосылку национальной безопасности каждой страны. А это, безусловно, обеспечит реализацию концепции устойчивого развития общества.

Значительное место в проблеме обеспечения промышленной и экологической безопасности занимает оценка безопасности. Для этого используются количественные показатели, которые предоставляют возможность проводить обоснованный анализ и принимать решение относительно техногенной безопасности промышленного объекта. В данное время существует