

**Семёнов Иван Александрович**,  
к.т.н., доцент, Ангарский государственный технический университет,  
e-mail: semenovia.chem@yandex.ru

**Шефер Павел Павлович**,  
магистрант, Ангарский государственный технический университет,  
e-mail: bezdnyy2@gmail.com

## **СПОСОБ РАСЧЕТА ПРОСТОЙ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ РЕКТИФИКАЦИИ СПОСОБОМ ФЕНСКЕ-АНДЕРВУДА-ДЖИЛЛИЛЭНДА**

**Semenov I.A., Shefer P.P.**

## **CALCULATING SIMPLE MULTI-COMPONENT RECTIFICATION BY THE FENSK-UNDERWOOD-GILLILAND METHOD**

**Аннотация.** Рассмотрен подход к расчету многокомпонентной простой ректификационной колонны согласно способу Фенске-Андервуда-Джиллилэнда.

**Ключевые слова:** псевдокомпоненты, метод Фенске, метод Андервуда, метод Джиллилэнда.

**Abstract.** An approach to calculating a multicomponent simple distillation column according to the Fensky-Underwood-Gilliland method is considered.

**Keywords:** pseudocomponents, Fensky's method, Underwood's method, Gilliland's method.

Многокомпонентную ректификацию используют во многих областях химической технологии для фракционирования сложных смесей на составные части. Это особенно важно в нефтепереработке, где сырая нефть и ее производные представляют собой сложные смеси переменного состава. Процесс ректификации позволяет разделять эти смеси на более узкие фракции, такие как бензин, дизельное топливо и другие, играющие решающую роль в производстве конечных продуктов на основе нефти.

При расчетах ректификации в области нефтепереработки существует проблема неопределенности состава сырой нефти и ее фракций. Эти вещества состоят из сложных смесей различных углеводородов, что делает точный анализ и расчет процесса разделения сложной задачей. Для упрощения расчетов и моделирования эти сложные смеси заменяются смесями псевдокомпонентов, которые выбирают на основе распределения их температур кипения согласно кривой разгонки.

Кривая разгонки показывает, как изменяется температура кипения в ходе лабораторной перегонки пробы нефти. Эта кривая отображает распределение компонентов в зависимости от их температур кипения. Данные, собранные в результате лабораторных испытаний, позволяют заменять нефть или фракции нефти смесями псевдокомпонентов, каждый из которых имеет известные концентрации. Такая замена позволяет применить общепринятые методы для расчета процесса ректификации.

Технический расчет простой ректификационной колонны проводится с целью определения важнейших параметров, влияющих на эффективность про-

цесса разделения и качество получаемых продуктов. Подобный расчет включает в себя:

1) Оценку скоростей потоков и концентраций компонентов, которые указывают на состав и чистоту образующихся продуктов.

2) Определение температуры и давления в различных точках колонны, необходимое для управления процессом и обеспечения оптимальных условий разделения.

3) Расчет количества тепла, необходимого для испарения компонентов, что служит основой для оценки энергопотребления и проектирования теплообменного оборудования для ректификации.

4) Оценку эффективности разделения компонентов для определения достижения желаемых характеристик продукта.

Одним из упрощенных методов расчета многокомпонентной простой ректификации является совместный способ Фенске-Андервуд-Джиллилэнда. Данный подход к расчету строится на трех основных методах [1]:

1) Метод Фенске позволяет на основе условия о полном орошении оценить минимальное количество ступеней ( $N_{MIN}$ ), необходимое для разделения при заданных концентрациях продуктов и известной относительной летучести компонентов.

2) Метод Андервуда вычисляет минимальное флегмовое число ( $R_{MIN}$ ) при условии неограниченного числа теоретических тарелок в колонне.

3) Эмпирическая зависимость Джиллилэнда помогает определить требуемое число теоретических ступеней ( $N$ ), необходимое для разделения, при рабочем флегмовом числе ( $R$ ).

В режиме полного орошения ректификация работает на рециркуляцию всего сконденсированного пара обратно в колонну. Продукт не отбирается в виде дистиллята, а вся сконденсированная жидкость возвращается в виде орошения. В таком режиме составы жидкости и пара на каждой ступени колонны равны друг другу. При этом для достижения заданной степени разделения требуется минимальное число ступеней ( $N_{MIN}$ ).

Метод Фенске позволяет оценить значение  $N_{MIN}$  при допущении о постоянстве относительной летучести по всей высоте колонны. Согласно этому методу концентрации компонентов  $x_A$  и  $x_B$  в кубе колонны ( $b$ ) и дистилляте ( $d$ ) для двухкомпонентной ректификации связаны следующим соотношением:

$$N_{MIN} = \frac{\ln \left[ \left( \frac{x_A}{x_B} \right)_d \left( \frac{x_B}{x_A} \right)_b \right]}{\ln(\alpha_{AB})},$$

где  $\alpha_{AB}$  – относительная летучесть компонента  $A$ .

Расчет многокомпонентных смесей согласно методу Фенске выполняется

на основе двух ключевых компонентов: легкого ( $LK$ ) и тяжелого ( $HK$ ). Как правило, эти вещества представляют в расчете отдельные фракции. Идея состоит в том, чтобы рассматривать многокомпонентную ректификацию как бинарную, что позволяет использовать уравнение Фенске для оценки минимального количества ступеней, которое необходимо для разделения.

В большинстве случаев задавать точные значения концентраций ключевых компонентов в продуктах разделения не всегда удобно. В этих случаях расчет значения  $N_{MIN}$  выполняют на основе их коэффициентов распределения между кубовым остатком и дистиллятом:

$$N_{MIN} = \frac{\ln \left[ \left( \frac{R_{LK}}{1 - R_{LK}} \right)_d \left( \frac{R_{HK}}{1 - R_{HK}} \right)_b \right]}{\ln(\alpha_{LK, HK})},$$

где  $R_{LK}$  и  $R_{HK}$  – коэффициенты распределения легкого и тяжелого ключевых компонентов в продуктах ректификации;  $\alpha_{LK, HK}$  – относительная летучесть легкого ключевого компонента относительно тяжелого.

При рассчитанном значении  $N_{MIN}$  коэффициенты распределения остальных веществ многокомпонентной смеси  $R_i$  находят из соотношения:

$$\left( \frac{R_i}{1 - R_i} \right)_d = (\alpha_{i, HK})^{N_{MIN}} \left( \frac{1 - R_{HK}}{R_{HK}} \right)_b$$

где  $\alpha_{i, HK}$  – относительная летучесть  $i$ -го компонента относительно тяжелого ключевого компонента.

Выбор подходящей пары ключевых компонентов имеет решающее значение для точного прогнозирования состава продуктов в процессах ректификации. Эта задача становится более сложной по мере увеличения числа веществ разделяемой смеси. Несмотря на эту проблему метод Фенске предлагает простой и эффективный подход к расчету состава продуктов.

Оценка величины  $R_{MIN}$  для многокомпонентной смеси может быть выполнена на основе метода Андервуда. В условиях минимального орошения для заданного разделения требуется бесконечное количество теоретических ступеней. В колонне при этом существуют зоны, где фактические концентрации потоков равны равновесным. Обычно в верхней и нижней частях колонны имеется по одной такой зоне.

При ректификации двухкомпонентной смеси при  $R_{MIN}$  обе зоны с равновесными составами пара и жидкости, как правило, располагаются рядом с тарелкой питания. Однако, при разделении многокомпонентной смеси зоны могут находиться в любой точке по высоте колонны.

Зависимость, полученная Андервудом, как и для метода Фенске строится на допущении о постоянстве относительных летучестей компонентов во всем

аппарате. Предполагается также, что массообмен в процессе ректификации эквивалентный, а мольные расходы пара и жидкости по высоте секций не меняются.

Способ оценки  $R_{MIN}$  по Андервуду начинается с поиска значения параметра  $\phi$  любым доступным численным методом из равенства:

$$1 - q = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_{i,HK} x_{i,f}}{\alpha_{i,HK} - \phi},$$

где  $q$  – доля жидкости в питании колонны, мол.дол.,  $x_{i,f}$  – концентрация  $i$ -го компонента в питании колонны, мол.дол.

В дальнейшем найденное значение параметра  $\phi$  используется для расчета величины  $R_{MIN}$  согласно зависимости:

$$R_{MIN} = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_{i,HK} x_{i,d}}{\alpha_{i,HK} - \phi} - 1,$$

где  $x_{i,d}$  – концентрация  $i$ -го компонента в дистилляте, мол.дол.

По найденному значению  $R_{MIN}$  может быть выбрано рабочее флегмовое число ( $R$ ) при условии, что  $R > R_{MIN}$ . Оценка требуемого числа теоретических ступеней ( $N$ ) при выбранной величине  $R$  выполняется согласно методу Джиллиленда по эмпирической зависимости вида:

$$\frac{N - N_{MIN}}{N + 1} = 1 - \exp \left[ \left( \frac{1 + 54,4 \Psi}{11 + 117,52 \Psi} \right) \left( \frac{\Psi - 1}{\Psi^{0,5}} \right) \right],$$

где  $\Psi = (R - R_{MIN}) / (R + 1)$ .

Определить место расположения тарелки питания позволяет зависимость Киркбрайда, по которой рассчитывают требуемое распределение теоретических ступеней между верхней ( $N_B$ ) и нижней ( $N_H$ ) частями колонны [1]:

$$\frac{N_B}{N_H} = \left[ \left( \frac{B}{D} \right) \left( \frac{x_{f,HK}}{x_{f,LK}} \right) \left( \frac{x_{b,LK}}{x_{d,HK}} \right)^2 \right]^{0,206},$$

где  $B$  и  $D$  – мольные расходы кубового остатка и дистиллята, кмоль/с.

Значения  $N_{min}$ ,  $R_{min}$  и  $N$  являются важнейшими параметрами при начальном проектировании колонн ректификации. Именно поэтому подход Фенске-Андервуд-Джиллиленда интегрирован в различные программы автоматизированного проектирования процессов, такие как *Aspen Hysys*, *ChemCAD*, *DWSim* и пр.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Liu, J. Predicting the products of crude oil distillation columns / A thesis submitted to the University of Manchester, 2021 – 138 p.