

УДК 665.63

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ КЛЮЧЕВОЙ ФРАКЦИИ НА ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА РЕКТИФИКАЦИИ ПРИ ОТБЕНЗИНИВАНИИ НЕФТИ

Савченков А.Л., Мозырев А.Г., Маслов А.А.*ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, e-mail: savchenkoval@tyuiu.ru*

Настоящая статья посвящена исследованию зависимости параметров процесса ректификации отбензинивающей колонны установки атмосферной перегонки нефти от степени извлечения ключевой фракции. Расчёты проводили методом температурной границы смеси. С увеличением чёткости ректификации происходит увеличение минимального флегмового числа в колонне, оптимальное флегмовое число при этом снижается. Происходит увеличение необходимого числа теоретических и рабочих тарелок как в верхней, так и в нижней частях ректификационной колонны. С увеличением степени извлечения ключевой фракции снижается необходимый диаметр колонны. При этом температура низа колонны повышается, а температура верха снижается. Происходит снижение величины необходимого количества тепла для подвода в низ колонны. Определены зависимости мольного состава дистиллята и остатка от чёткости ректификации.

Ключевые слова: ректификация, ключевая фракция, температурная граница, флегмовое число, число тарелок, диаметр колонны, температурный режим колонны

INFLUENCE OF KEY FRACTION RECOVERY RATE ON RECTIFICATION PROCESS PERFORMANCE AT CRUDE TOPPING

Savchenkov A.L., Mozyrev A.G., Maslov A.A.*Industrial University of Tyumen, Tyumen, e-mail: savchenkoval@tyuiu.ru*

The present paper is devoted to the study of the dependence of parameters of the rectification process of topping column of atmospheric crude oil distillation unit from recovery rate of key fraction. The calculations were made by the method of temperature limit of mixture. As the rectification sharpness increases, an increase of the minimum reflux ratio occurs in the column, while the optimum reflux ratio decreases. There is an increase in the required number of theoretical and column plates, both in the upper and bottom parts of the rectification column. As the recovery rate of the key fraction increases, the required diameter of the column decreases. While the temperature of the bottom of the column rises, the temperature of the top decreases. There is a decrease in the necessary amount of heat entering the tower bottom. The dependences of the molar composition of the distillate and the residue on the rectification sharpness are determined.

Keywords: rectification, key fraction, temperature limit, reflux ratio, number of plates, column diameter, temperature mode of column

Ректификация многокомпонентных и непрерывных углеводородных смесей является одним из самых распространённых процессов в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности [1]. При первичной переработке нефти чёткость ректификации остаётся основной задачей. Чёткость разделения связана со всеми технологическими и конструктивными параметрами ректификационной колонны. Выход и качество целевых фракций также связаны с чёткостью ректификации [2].

Ректификация нефти является высокоэнергетическим процессом [3]. До трети энергозатрат нефтеперерабатывающих предприятий приходится именно на ректификацию. Более 3 % от всей вырабатываемой энергии в США приходится на перегонку. Например, при удвоении диаметра ректификационной колонны происходит увеличение необходимого количества подводимого тепла в куб колонны в четыре раза. В работе [4] отмечено, что внедрение оптимального режима работы ректификационной колонны

может привести к уменьшению энергозатрат до 30 %.

Среди установок атмосферной перегонки нефти наибольшее применение получили установки с предварительным отбензиниванием нефти. Такие установки технологически гибкие и работоспособные при значительном изменении содержания лёгких фракций в нефти. Применение отбензинивающей колонны на установке приводит к снижению необходимого давления в основной колонне и, следовательно, к повышению отбора светлых фракций. Состав дистиллята отбензинивающей колонны влияет на работу основной атмосферной колонны, изменяет баланс всей установки [5]. В связи с этим оптимизация технологии отбензинивающей колонны является важной задачей.

Объектом исследований являлась колонна отбензинивания установки атмосферной перегонки нефти одного из нефтеперерабатывающих заводов Тюменской области. Установка работает с двукратным испарением нефти. Поступает на переработку нефть

месторождений Западной Сибири. Верхним продуктом отбензинивающей колонны является фракция бензина, выкипающая до 140 °С. В работе исследовали влияние чёткости ректификации в данной отбензинивающей колонне на показатели процесса перегонки нефти. В качестве основных показателей были выбраны: необходимое число контактных ступеней, флегмовое число, температурный режим колонны, минимально необходимый диаметр обечайки, теплозатраты для обеспечения необходимой температуры низа колонны.

Из приближённых аналитических методов расчёта процесса ректификации многокомпонентных смесей наиболее удобными и достаточно точными являются метод ключевых компонентов и метод температурной границы деления смеси. Более простым является метод ключевых компонентов, но применяют его при чётком делении исходной смеси. Метод температурной границы деления смеси позволяет рассчитывать чёткое и нечёткое разделение, что определяется задачей работы, поскольку в качестве исходных данных принимают разные независимые переменные. Метод ключевых компонентов применяется обычно для ручных расчётов. Для получения надёжных результатов расчёта лучше применять метод температурной границы деления смеси. Расчёт ректификации непрерывной смеси можно выполнять путём её дискретизации, то есть представления исходной смеси углеводородов в виде псевдокомпонентной, состоящей из условных компонентов (узких фракций) с узкими интервалами температур выкипания.

В случае нефти и её фракций за условные компоненты принимают углеводороды, у которых средняя температура кипения и плотность соответствуют таким же физическим свойствам узких фракций.

В работе применялся расчёт процесса ректификации нефти методом температурной границы деления смеси. Чёткость ректификации оценивали по значению степени извлечения лёгкой ключевой фракции, которая переходит при ректификации нефти в дистиллят. Исходная нефть разделялась на двенадцать узких фракций (компонентов): газ до С₄, 28–62 °С, 62–100 °С, 100–120 °С, 120–140 °С, 140–160 °С, 160–180 °С, 180–210 °С, 210–250 °С, 250–300 °С, 300–400 °С и более 400 °С. Пять первых компонентов переходят при отбензинивании в дистиллят, остальные – в остаток. Фракции 120–140 °С и 140–160 °С, располагающиеся по разные стороны условной границы деления нефти, определены как ключевые фракции.

Мольная доля отбора дистиллята E' определялась как сумма мольных долей

первых пяти компонентов. Далее выбирали значение степени извлечения лёгкой ключевой фракции ϕ_{Di} , переходящей в дистиллят. В зависимости от значений E' и ϕ_{Di} рассчитывалась мольная доля лёгкой ключевой фракции в верхнем X'_{Di} и нижнем X'_{wi} продукте отбензинивающей колонны:

$$X'_{Di} = \frac{\phi_{Di} \cdot X'_{Fi}}{E'}, \quad X'_{wi} = \frac{(1 - \phi_{Di}) \cdot X'_{Fi}}{1 - E'}.$$

При известном давлении в колонне находились температуры кипения ключевых фракций. Температурная граница T_E подбиралась между значениями температур кипения ключевых компонентов таким образом, чтобы были выполнены условия

$$\sum X'_{Di} = 1, \quad \sum X'_{wi} = 1.$$

Мольный состав верхнего и нижнего продукта, а также материальный баланс колонны рассчитывался на основе определения для всех компонентов коэффициентов летучести α_i и коэффициентов распределения ψ_i .

Минимальное число тарелок $N_{\min}$ процесса ректификации определялось по значению коэффициента летучести и коэффициента распределения лёгкой ключевой фракции:

$$N_{\min} = \frac{\lg \psi_i}{\lg \alpha_i}.$$

Для остальных компонентов коэффициенты распределения находились по уравнению

$$\psi_i = \alpha_i^{N_{\min}}.$$

Температурный режим колонны рассчитывался по уравнениям изотермы паровой и жидкой фазы для определения соответственно температуры верха T_v и низа T_n отбензинивающей колонны. Из уравнения Андервуда находилось минимальное $R_{\min}$ флегмовое число:

$$\sum \frac{\alpha_i \cdot X'_{Fi}}{\alpha_i - \Theta} = R_{\min} + 1,$$

где Θ – корень уравнения, величина которого находится между значениями коэффициентов летучести ключевых компонентов.

Оптимальное флегмовое число $R_{\text{опт}}$ определялось графическим способом Джиллиленда. Далее находилось оптимальное $N_{\text{опт}}$ и рабочее $N_{\text{раб}}$ число тарелок в колонне.

Теплозатраты Q_B для обеспечения необходимой температуры низа колонны определялись после составления теплового баланса. Минимально необходимый диаметр колонны D_K находился по данным расчёта объёмного расхода паров в верхней и нижней частях колонны.

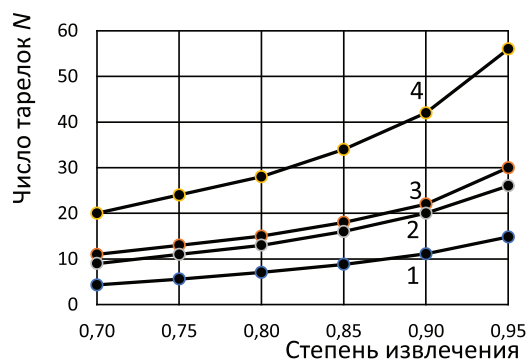


Рис. 1. Зависимости числа тарелок в колонне от степени извлечения ключевой фракции: 1 – минимальное число теоретических тарелок N_{min} , 2 – рабочее число в исчерпывающей части колонны $N_{раб(н)}$, 3 – рабочее число в концентрационной части колонны $N_{раб(к)}$, 4 – общее число рабочих тарелок $N_{раб}$

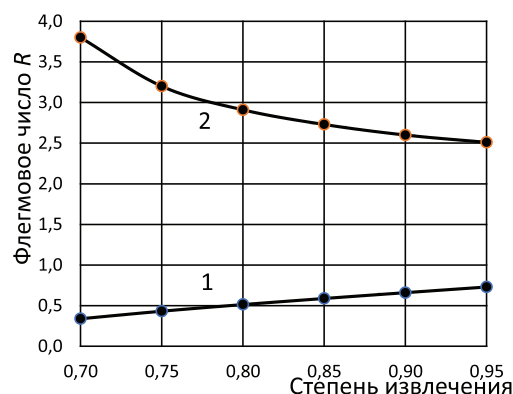


Рис. 2. Зависимость минимального R_{min} (кривая 1) и оптимального R_{opt} (кривая 2) флегмового числа от степени извлечения ключевой фракции

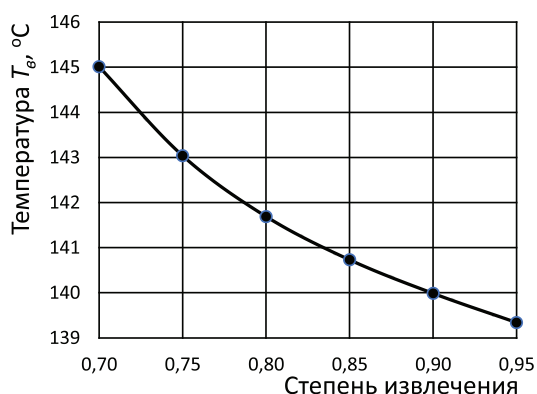


Рис. 3. Зависимость температуры верха колонны T_v от степени извлечения ключевой фракции ϕ

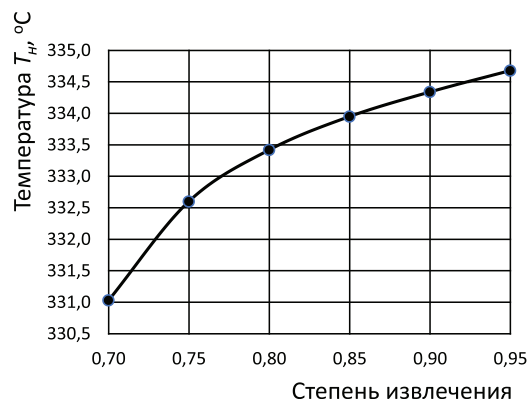


Рис. 4. Зависимость температуры низа колонны T_n от степени извлечения ключевой фракции ϕ

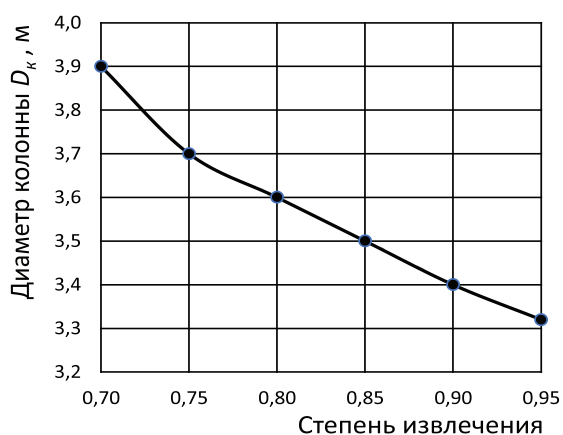


Рис. 5. Зависимость диаметра колонны D_k от степени извлечения ключевой фракции ϕ

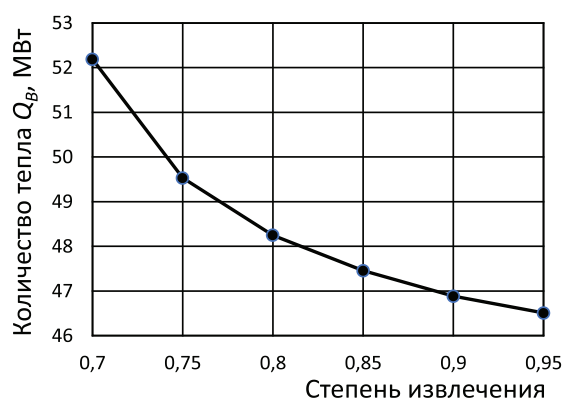


Рис. 6. Зависимость количества тепла Q_{Br} , которое необходимо подвести в куб колонны от степени извлечения ключевой фракции ϕ

На рис. 1–6 и в табл. 1–2 представлены результаты работы – зависимости основных параметров работы ректификационной колонны от степени извлечения ключевой фракции 120–140 °С из нефти.

В табл. 1 и 2 представлены зависимости составов дистиллята и остатка от степени извлечения ключевой фракции 120–140 °С. С увеличением степени извлечения ключевой фракции 120–140 °С в отбензинивающей колонне с 0,7 до 0,95 минимальное число теоретических тарелок увеличивается, увеличивается соответственно рабочее число тарелок в концентрационной части и в исчерпывающей частях колонны (рис. 1).

Общее число рабочих тарелок в колонне при этом возрастает с 20 до 56. Причём количество тарелок в каждой части колон-

ны (и в концентрационной, и в исчерпывающей) при данных условиях увеличивается примерно в три раза (в первом случае с 11 до 30, во втором – с 9 до 26), то есть пропорционально. Увеличение необходимого числа рабочих тарелок приводит к увеличению высоты колонны и, следовательно, и её стоимости.

Минимальное флегмовое число в колонне с увеличением степени извлечения возрастает с 0,33 до 0,73, а оптимальное флегмовое число снижается с 3,8 до 2,5 (рис. 2). Снижение оптимального флегмового числа приводит к уменьшению эксплуатационных затрат на процесс ректификации, так как требуется подавать насосом меньшее количество флегмы на верхнюю тарелку колонны.

Таблица 1

Влияние степени извлечения ключевой фракции на состав дистиллята

Фракция, °С	Степень извлечения					
	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95
	Состав дистиллята, % мольн.					
Газ до С ₄	19,17	19,17	19,17	19,17	19,17	19,17
28–62	35,71	35,74	35,74	35,74	35,74	35,74
62–100	20,46	20,62	20,66	20,67	20,67	20,67
100–120	11,02	11,50	11,77	11,90	11,96	11,98
120–140	8,71	9,33	9,95	10,57	11,19	11,81
140–160	3,87	3,19	2,53	1,88	1,25	0,62
160–180	0,91	0,42	0,17	0,06	0,01	0,001
180–210	0,14	0,03	0,006	0,0007	0	0
210–250	0,005	0	0	0	0	0
250–300	0	0	0	0	0	0
300–400	0	0	0	0	0	0
>400	0	0	0	0	0	0

Таблица 2

Влияние степени извлечения ключевой фракции на состав остатка

Фракция, °С	Степень извлечения					
	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95
	Состав остатка, % мольн.					
Газ до С ₄	0	0	0	0	0	0
28–62	0,01	0,002	0	0	0	0
62–100	0,10	0,02	0,005	0,0007	0	0
100–120	0,48	0,24	0,10	0,04	0,01	0,001
120–140	1,87	1,56	1,25	0,94	0,62	0,31
140–160	4,43	4,77	5,10	5,43	5,74	6,06
160–180	6,02	6,27	6,39	6,45	6,47	6,48
180–210	9,66	9,71	9,73	9,73	9,73	9,73
210–250	12,78	12,78	12,80	12,78	12,78	12,78
250–300	14,61	14,61	14,61	14,61	14,61	14,61
300–400	22,46	22,46	22,46	22,46	22,46	22,46
>400	27,57	27,57	27,57	27,57	27,57	27,57

Температура верха колонны с увеличением степени извлечения снижается со 145 до 138 °С (рис. 3). Это связано с тем, что снижается температура конденсации дистиллята, так как углеводородный состав дистиллята изменяется в сторону снижения молярной массы.

Температура низа колонны с увеличением степени извлечения повышается с 331 до 336 °С (рис. 4). Это связано с тем, что повышается температура кипения остатка из-за увеличения его средней молярной массы.

Необходимый диаметр колонны при повышении степени извлечения снижается с 3,9 до 3,3 м (рис. 5), что связано с уменьшением количества дистиллята, а значит, и объёмного расхода паров в поперечном сечении колонны.

Количество тепла, которое необходимо подвести в куб колонны, также снижается с 52,2 до 46,5 МВт, что также связано с уменьшением необходимого количества паровой фазы в колонне.

Анализ изменения состава дистиллята и остатка показывает следующее. В дистилляте с увеличением степени извлечения заметно меняется концентрация фракций, которые находятся вблизи температурной границы деления смеси (табл. 1). Так, содержание фракции 120–140 °С увеличивается с 8,7 до 11,8 % мольн., а содержание фракции 140–160 °С снижается с 3,9 до 0,62 % мольн. В дистилляте происходит увеличение концентрации целевых фракций, которые должны пойти в дистиллят, и снижение концентрации фракций, которые должны перейти в остаток.

В остатке с увеличением степени извлечения также заметно меняются концентрации ключевых компонентов (табл. 2). Так, содержание фракции 120–140 °С снижается с 1,9 до 0,3 % мольн., а содержание фракции 140–160 °С повышается с 4,4 до 6,1 % мольн. Следовательно, происходит увеличение содержания фракций, которые должны перейти в остаток, и снижение содержания фракций, которые должны перейти в дистиллят.

Таким образом, в работе показано, что повышение чёткости ректификации приводит к увеличению необходимого числа

теоретических и рабочих контактных ступеней в колонне. Увеличение чёткости ректификации ведёт также к росту величины минимального флегмового числа в колонне. Оптимальное флегмовое число при этих условиях стремится к снижению в связи с уменьшением количества верхнего продукта. Это приводит также к уменьшению минимального диаметра колонны и количества подводимого тепла в низ колонны. С повышением степени извлечения лёгкой ключевой фракции в отбензинивающей колонне происходит снижение средней молярной массы верхнего продукта, что приводит к уменьшению температуры конденсации паров дистиллята и, следовательно, необходимой температуры верха колонны. При этих же условиях средняя молярная масса нижнего продукта колонны увеличивается, повышается температура кипения остатка и температура низа колонны. В мольном составе верхнего продукта колонны с ростом степени извлечения лёгкой ключевой фракции происходит увеличение доли компонентов, извлекаемых по условиям разделения в дистиллят. В мольном составе нижнего продукта при этом происходит повышение доли компонентов, извлекаемых в остаток.

Список литературы

1. Волосов И.В. Анализ работы установки первичной переработки нефти / И.В. Волосов, С.М. Леденев // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2017. – № 6. – С. 217–218.
2. Асатрян А.А. Обзор технологических аспектов режима работы АВТ с учетом особенностей планирования производственной деятельности / А.А. Асатрян, Ю.П. Ясьян // Успехи современной науки. – 2017. – Т. 2, № 5. – С. 78–81.
3. Зиятдинов Н.Н. О подходе к решению задачи оптимального проектирования системы ректификационных колонн методом ветвей и границ / Н.Н. Зиятдинов, Н.Ю. Богула, Г.М. Островский // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – Т. 2, № 10 (44). – С. 13–16.
4. Башаров М.М. Решение задач по модернизации и повышению эффективности установок в нефтегазопереработке / М.М. Башаров, Е.П. Афанасьев // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. – 2015. – № 11–1. – С. 62–66.
5. Пикалов И.С. Влияние глубины предварительного отбензинивания нефти на показатели атмосферой перегонки / И.С. Пикалов, С.Н. Овчаров, С.В. Алференко // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2010. – № 4. – С. 78–85.