

Повышение вариативности выпускаемой товарной продукции установки каталитического риформинга

Павел И. Трифонов¹ svpopov2018@ya.ru
Сергей В. Попов¹ svpopov2018@ya.ru  0000-0003-0533-9049

¹ Самарский государственный технический университет, филиал в г. Новокуйбышевске, ул. Миронова, 5, г. Новокуйбышевск, 446200, Россия

Аннотация. Стабильный риформат установок каталитического риформинга, в частности установки CCR, содержит в себе большое количество (до 77% масс.) ароматических углеводородов, из них треть – ксилолы. На промышленных установках при выпуске товарных бензинов возникает ситуация, когда показатель октанового числа превышает необходимое значение. В связи с этим существует возможность выделения из стабильного риформата потока суммарных ксилолов, что позволит повысить вариативность выпускаемой товарной продукции и привести показатель октанового числа к нормативному значению. В работе выполнено исследование возможных вариантов схемы выделения ксилолов из стабильного риформата для увеличения вариативности выпускаемой товарной продукции. Для оценки достигаемых показателей возможных технологических схем выделения из стабильного риформата ксилольной фракции были рассмотрены следующие варианты: сложная колонны с боковым отбором ксилольной фракции, сложная колонна со стриппинг секцией и схема из двух последовательно соединённых ректификационных колонн. Исследование выполнено с использованием моделирующей системы UniSim Design. Предложена двух колонная технологическая схема блока вторичной ректификации стабильного риформата, обеспечивающая достижение содержания ксилольной фракции в товарном продукте более 97% масс. при 84%-ом отборе ксилолов от их содержания в потоке питания предлагаемой технологической схемы. Число клапанных тарелок составляет 50 для первой колонны и 70 для второй, с учётом стоимости проектно-изыскательных работ, поставки материально-технических ресурсов, а также затрат на строительные-монтажные работы, срок окупаемости предлагаемого проекта составит 3,5 года.

Ключевые слова: каталитический риформинг, ксилолы, ректификация, моделирование, UniSim Design

Increasing the variability of the manufactured commercial products of the catalytic reforming plant

Pavel I. Trifonov¹ svpopov2018@ya.ru
Sergey V. Popov¹ svpopov2018@ya.ru  0000-0003-0533-9049

¹ Samara State Technical University, branch in Novokuibyshevsk, st. Mironova, 5, Novokuibyshevsk, 446200, Russia

Abstract. The stable reformat of catalytic reforming plants, in particular CCR plants, contains a large amount (up to 77% by weight). aromatic hydrocarbons, of which one third are xylenes. In industrial installations, when producing commercial gasoline, a situation arises when the octane index exceeds the required value. In this regard, it is possible to isolate the flow of total xylenes from a stable reformat, which will increase the variability of manufactured commercial products and bring the octane index to a normative value. The study of possible variants of the scheme for the separation of xylenes from a stable reformat to increase the variability of manufactured marketable products is carried out. To assess the achieved indicators of possible technological schemes for the separation of xylene fraction from a stable reformat, the following options were considered: a complex column with lateral selection of xylene fraction, a complex column with a stripping section and a scheme of two sequentially connected distillation columns. The study was performed using the UniSim Design modeling system. A two-column technological scheme of the secondary rectification unit of a stable reformat is proposed, which ensures that the content of the xylene fraction in the commercial product exceeds 97% by weight. with 84% selection of xylenes from their content in the feed stream of the proposed technological scheme. The number of valve plates is 50 for the first column and 70 for the second, Taking into account the cost of design and survey work, the supply of material and technical resources, as well as the cost of construction and installation work, the payback period of the proposed project will be 3.5 years.

Keywords: catalytic reforming, xylenes, rectification, modeling, UniSim Design

Для цитирования

Трифонов П.И., Попов С.В. Повышение вариативности выпускаемой товарной продукции установки каталитического риформинга // Вестник ВГУИТ. 2024. Т. 86. № 3. С. 258–266. doi:10.20914/2310-1202-2024-3-258-266

For citation

Trifonov P.I., Popov S.V. Increasing the variability of the manufactured commercial products of the catalytic reforming plant. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2024. vol. 86. no. 3. pp. 258–266. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2024-3-258-266

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Нефтехимическая отрасль и производство нефтехимических продуктов является основой развития промышленности. Одним из основных видов сырья в нефтехимии являются ароматические углеводороды, а именно ксилолы.

Ксилолы (диметилбензолы) получают из нефти путём каталитического риформинга прямогонной бензиновой фракции или при коксовании угля. Ключевой сферой применения параксилола является производство терефталевой кислоты (ТФК), ортоксилола – производство фталевого ангидрида. В качестве товарного продукта ксилолы применяются главным образом в качестве растворителей.

В большом количестве работ рассматриваются технологии по выделению ксилолов методом экстракции [1–4]. Данный метод эффективен, но не применим к нефтеперерабатывающему предприятию в связи со своими высокими капиталозатратами.

Из-за схожих химических структур и физических свойств углеводородную смесь бензола, толуола и ксилолов сложно разделить классической ректификацией. Для их более чёткого фракционирования может применяться мембранное разделение, где в качестве мембран могут использоваться материалы на основе полиамидов [6], модифицированной целлюлозы [7], а в работе [8] в качестве мембраны использовались уникальные материалы: сшитый полидиметилсилоксан и триацетата целлюлозы. Методы, описанные в данных работах, показали высокую селективность и надёжность.

В работах [9–10] рассматривается технология по выделению ксилолов методом ректификации. Установка состоит из 3 ректификационных колонн, в качестве сырья используется облегчённая фракцию с температурой кипения 105–127 °С.

Особое место в разделении многокомпонентных систем, в том числе ароматических соединений, занимают схемы с применением колонн FTCDС, более известной как «колонна Петлюка». В работах [11–12] описывают функционирование таких колонн в качестве замены каскада, состоящего из 3-х последовательных ректификационных колонн, использующегося для фракционирования ароматических углеводородов, входящих в состав риформата.

Характерными особенностями таких схем является то, что все секции сложной колонны связаны между собой противоположно направленными потоками пара и жидкости (термической или тепловой связью), промежуточные по летучести продукты выделяются во внутренних точках схемы (точках, связанных с двумя различными секциями), ключевыми не обязательно являются крайние по летучести компоненты.

Термодинамические преимущества такого способа разделения обусловлены отсутствием термодинамических потерь при смешении потоков в зонах питания и отбора продуктовых фракций, а также термодинамических потерь при подводе и отводе тепла во всех точках вывода промежуточных по летучести продуктов. Вместе с тем такие системы обладают рядом недостатков, затрудняющих их промышленное использование: необходимость поддерживать одно и то же давление во всех колоннах комплекса, увеличение числа ступеней разделения по сравнению с традиционными схемами из простых двухсекционных колонн, а также усложняются схемы регулирования.

Проектирование процесса фракционирования риформата с использованием колонны с разделительной стенкой описано в [13, 14]. Показано, что при моделировании системы разделения получено хорошее согласование расчётных и экспериментальных данных, и сделан вывод о возможности снижения энергопотребления на 50%, что сможет сделать экономически выгодным инвестиции и эксплуатацию комплекса с разделительной стенкой.

Большое количество работ [15–18] уделено рассмотрению вопроса усовершенствованию работы реактора каталитического риформинга и использованию программ на основе кинетических моделей для прогнозирования выхода ароматических углеводородов и увеличения эффективности процесса.

Стабильный риформат установок каталитического риформинга, в частности установки ССR, содержит в себе большое количество (до 77% масс.) ароматических углеводородов, из них треть – ксилолы (рисунок 1).

На промышленных установках при выпуске товарных бензинов возникает ситуация, когда показатель октанового числа (ОЧ) превышает необходимое значение. В связи с этим существует возможность выделения из стабильного риформата потока суммарных ксилолов, что позволит повысить вариативность выпускаемой товарной продукции и привести показатель ОЧ к нормативному значению.

Цель работы – исследование возможных вариантов схемы выделения ксилолов из стабильного риформата установки ССR для увеличения вариативности выпускаемой товарной продукции.

Методы

Продуктом установки ССR является высокооктановый компонент – риформат. На рисунке 2 представлен фрагмент технологической схемы блока стабилизации установки, с которого выходит готовый продукт.

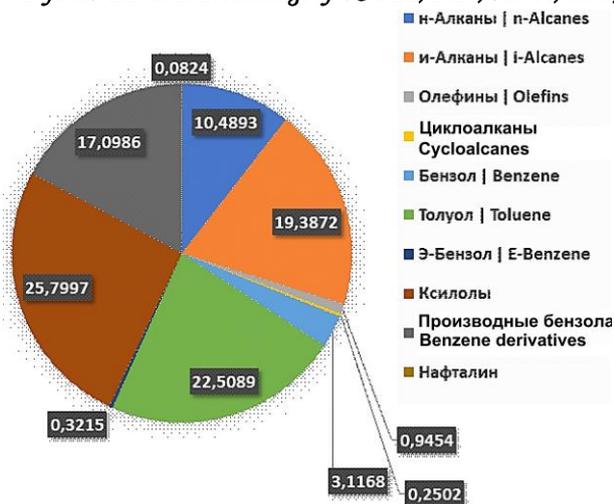


Рисунок 1. Диаграмма состава стабильного риформата, % масс.

Figure 1. Diagram of the composition of a stable reformat, % by weight

В соответствии с технологической схемой нестабильный риформат проходит теплообменник Т-1 поступает на питание 21 тарелки колонны-дебутанизатора К-1. Верхний охлаждённый

продукт поступает в сепаратор С-1, где происходит разделение газовой и жидкой фазы. С низа колонны отводится стабильный риформат, часть которого при помощи насоса Н-1 подаётся на подогрев колонны К-1, а балансовое количество проходит через теплообменники Т-1; Т-4; Т-5 и поступает в товарный парк.

В таблице 1 показан усреднённый состав стабильного риформата установки ССР.

Из таблицы 1 видно, что в составе риформата содержится большое количество ксилолов ~28,2% масс. ОЧ которого составляет 116 пунктов по исследовательскому методу (ИМ). Для промышленных предприятий с целью изменения октанового числа автомобильного бензина существует принципиальная возможность выделения ксилольной фракции для варьирования данного показателя.

Исследования проводили с использованием моделирующей программной среды Unisim Design. В качестве математического пакета для расчёта термодинамических свойств компонентов технологических потоков использовали метод Peng-Robinson.

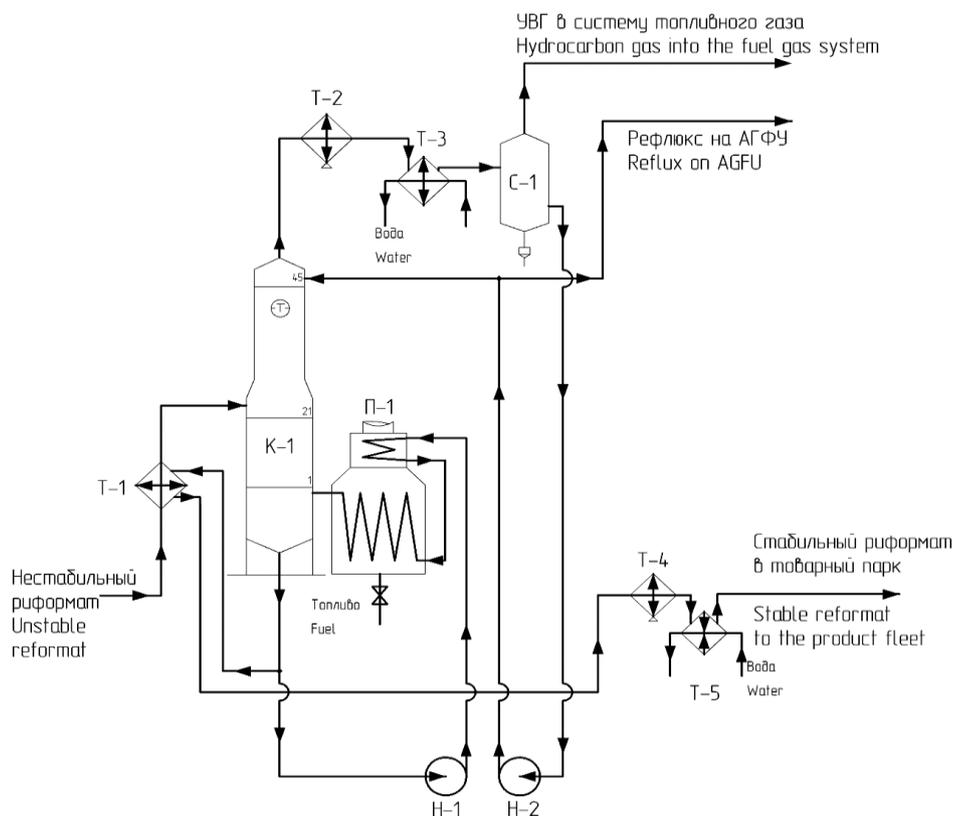


Рисунок 2. Фрагмент схемы блока стабилизации типовой установки каталитического риформинга

Figure 2. A fragment of the scheme of the stabilization unit of a typical catalytic reforming unit

Результаты и обсуждение

Для оценки достигаемых показателей возможных технологических схем выделения из стабильного риформата ксилольной фракции были рассмотрены следующие варианты: сложная колонна с боковым отбором ксилольной фракции, сложная колонна со стриппинг секцией и схема из двух последовательно соединённых ректификационных колонн. Во всех вариантах используются клапанные тарелки с $\kappa_{\text{пд}} = 0,8$.

Схема сложной колонны с боковым отбором ксилольной фракции показана на рисунке 3. В качестве критерия оптимизации работы колонны выбрано количество отбираемых суммарных ксилолов и качественный состав получаемой фракции. Расчёты показали, что даже при числе тарелок в аппарате $N = 170$ в отбираемом боковом погоне содержание суммарных ксилолов составляет величину не более 82,2% масс. при 80%-ом отборе ксилолов от их потенциального содержания в питании колонны. Согласно нормативной документации по качеству суммарных ксилолов их содержание во фракции должно быть более

97% масс., следовательно, использование рассматриваемого варианта нецелесообразно.

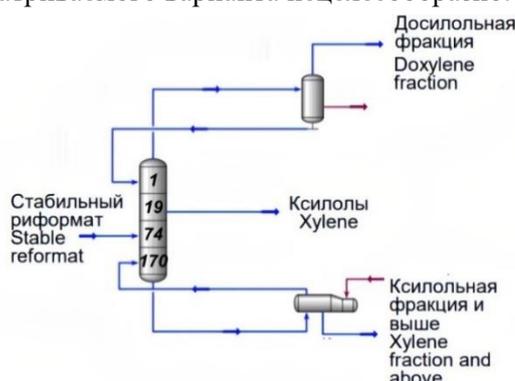


Рисунок 3. Схема сложной колонны с боковым погонем ксилольной фракции

Figure 3. Diagram of a complex column with a side slope of the xylene fraction

На рисунке 4 приведено аппаратное оформление блока вторичный ректификации риформата, представляющий собой схему сложной колонны со стриппинг-секцией для отбора ксилольной фракции.

Таблица 1.

Состав потока стабильного риформата (а, б), поступающего в товарный парк

Table 1.

Composition of the stable reformat stream (a, b) coming to the commodity depot

Компоненты Components	Содержание, % масс. Content, % by weight
Пропан Propane	0,6285
i-Бутан i-Butane	1,4410
1-Бутен 1-Butene	0,0326
n-Бутан n-Butane	1,5969
2М-1-Бутен 2М-1-butene	0,2910
3М-1-Бутен 3М-1-butene	0,0047
i-Пентан i-Pentane	3,0961
n-Пентан n-Pentane	1,5015
1-Пентен 1-Pentene	0,3259
22-Мбутан 22-Mbutane	0,2165
23-Мбутан 23-Mbutane	0,1723
2-Мпентан 2-Mpentane	0,9032
3-Мпентан 3-Mpentane	0,6867
2М1С5 = 2-Methyl-1-pentene	0,0175
n-Гексан n-Hexane	0,7519
тр 2-Гексен tr2-Hexene	0,0128
22-Мпентан 22-Mpentane	0,5284
24-Мпентан 24-Mpentane	0,5133
Мциклопентан Mсyclopentan	0,1280
223-Мбутан 223-Mbutane	0,0791
Бензол Benzene	2,5048
33-Мпентан 33-Mpentane	0,4935

(a)

Компоненты Components	Содержание, % масс. Content, % by weight
Циклогексан Cyclohexane	0,0500
2-Мгексан 2-Mhexane	3,0577
23-Мпентан 23-Mpentane	1,1860
11-Мциклопентан 11-Мсусрpentan	0,0338
3-Мгексан 3-Mhexane	3,7839
3-Этилпентан 3-Epentane	0,4097
1-Гептен 1-Heptene	0,0128
n-Гептан n-Heptane	2,8621
22-Мгексан 22-Mhexane	0,1641
Толуол Toluene	21,3384
23-Мгексан 23-Mhexane	0,1723
2-Мгептан 2-Mheptane	0,6099
n-Октан n-Octane	0,7414
Этилбензол E-Benzene	0,3512
m-Ксилол m-Xylene	13,2958
p-Ксилол p-Xylene	5,6400
o-Ксилол o-Xylene	9,2452
n-Нонан n-Nonane	0,2060
тр- С3 = Бензол tr-C3 = Benzene	20,7902
Нафталин Naphthalene	0,1234
Итого Total	100,0000

(b)

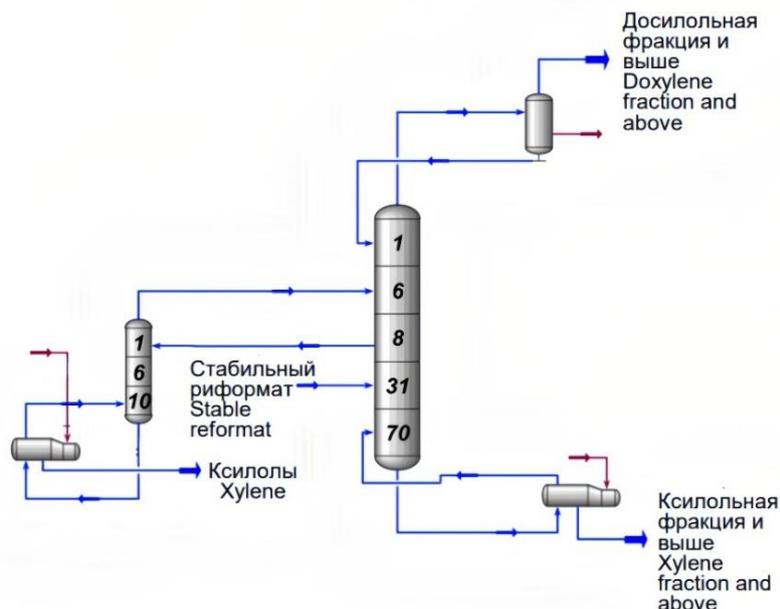


Рисунок 4. Схема сложной колонны со стриппинг-секцией для отбора ксилольной фракции
 Figure 4. Diagram of a complex column with a stripping section for the selection of the xylene fraction

Стабильный риформат после блока стабилизации поступает на 31 тарелку колонны, в которой кубовым продуктом происходит отделение тяжёлой фракции, состоящей из ароматических углеводородов C9+, с веру колонны выходит доксилольная фракция, подогрев осуществляется за счёт рибойлера. Давление куба колонны составляет 750 кПа, а верхней части 700 кПа. Часть ксилольной фракции отбирается при помощи стриппинг-секции, поток направляется с 8 тарелки основной колонны. Для подогрева стриппинг-секции используется рибойлер, обеспечивающий наиболее чёткую ректификацию и высокую чистоту ксилольной фракции. С куба стриппинг-секции происходит отбор ксилольной фракции, которая может направляться на отгрузку в товарный парк.

В рассматриваемом варианте в отбираемом со стриппинг-секции потоке содержание

суммарных ксилолов составляет величину не менее 97,8% масс. при 84%-ом отборе ксилолов от их содержания в питании колонны. Приведенные результаты показывают возможность использования данного варианта технологической схемы для выделения ксилоловой фракции.

На рисунке 5 показан возможный вариант технологической схемы блока вторичной ректификации стабильного риформата с двумя последовательными ректификационными колоннами. Колонна Т-402 будет расположена после блока стабилизации, что позволит варьировать количество отводимого риформата на блок вторичной ректификации с помощью клапана, привязанного к расходомеру, который будет установлен на вновь монтируемую линию, а также позволит осуществлять ремонт данного блока без полной остановки секции риформинга.

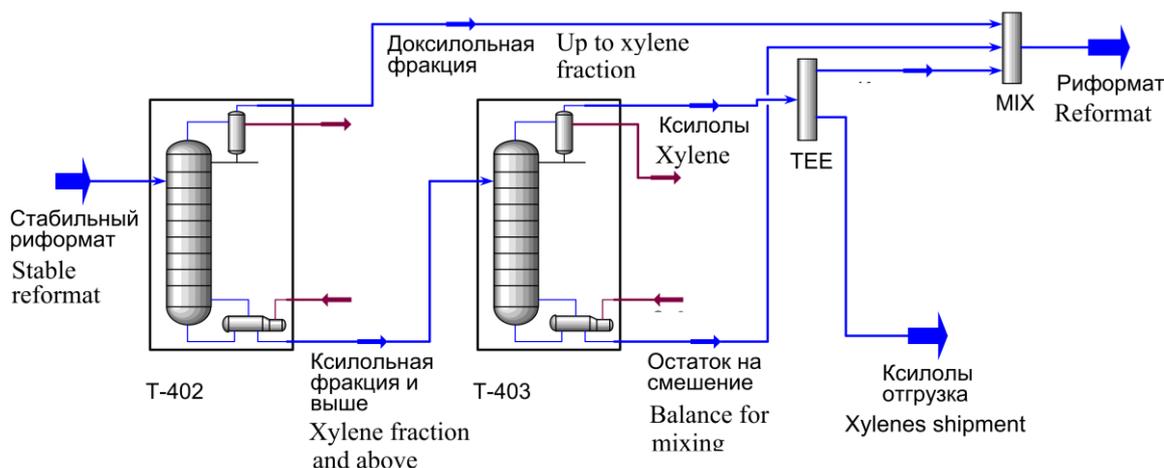


Рисунок 5. Схема блока вторичной ректификации риформата
 Figure 5. Diagram of the reformat secondary rectification unit

Поток стабильного риформата поступает на 22 тарелку колонны Т-402, значения его технологических параметров представлены в таблице 2 (синий цвет – задаваемые значения, чёрный – расчётные данные).

Целью колонны является отведение доксилольной фракции. Кубовый продукт колонны, содержащий в своём составе ксилольную фракцию и выше, направляется в колонну Т-403.

Выполненными расчётами установлено, что для наиболее полного отделения доксилольной фракции из стабильного риформата колонна Т-402 должна содержать 50 клапанных трёх-поточных тарелок с КПД = 0,8. При уменьшении числа тарелок колонны Т-402 содержание близко кипящих компонентов, таких как этилбензол и толуол в кубовом продукте, возрастает, что ухудшает качество получаемых суммарных ксилолов.

Кубовый продукт колонны Т-402 поступает на 12 тарелку колонны Т-403, целью которой

является извлечение ксилольной фракции, которая будет отводиться с верха колонны. В качестве контактных устройств были выбраны клапанные трёх-поточные тарелки с КПД = 0,8. Количество тарелок (n) составляет 70 штук. Основные параметры колонн Т-402 и Т-403 приведены в таблице 3.

При уменьшении числа тарелок $n < 70$ чистота ксилольной фракции падает.

В рассматриваемом варианте двух колонной ректификационной системы в отбираемом потоке (поток Ксилолы отгрузка, рисунок 5) содержание суммарных ксилолов составляет величину не менее 97,8% масс. при 84%-ом отборе ксилолов от их содержания в питании колонны (таблица 4), то есть получены показатели, аналогичные варианту схемы колонны со стриппинг-секцией. Следовательно, использование данного варианта технологической схемы также возможно для выделения ксилоловой фракции.

Таблица 2.
Параметры потока, входящего в колонну Т-402

Table 2.

Parameters of the flow entering the T-402 column

Название потока Stream Name	Стабильный риформат Stable reformat
Доля паровой фазы Vapour / Phase Fraction	0,0000
Температура [° C] Temperature [° C]	38,50
Давление [кПа] Pressure [kPa]	882,6
Молярный поток [кмоль/ч] Molar Flow [kmole/h]	929,8
Массовый поток [кг/ч] Mass Flow [kg/h]	9,037 e + 004
Объёмный расход [м³/ч] Std Ideal Lig Vol Flow [m³h]	112,0
Молярная энтальпия [кДж/кгмоль] Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-4,689 e + 004
Молярная энтропия [кДж/кгмоль° C] Molar Entropy [kJ/kgmole° C]	32,31
Тепловой поток [кДж/ч] Heat Flow [kJ/h]	-4,360 e + 007

Таблица 3.
Параметры колонн Т-402 и Т-403

Table 3.

Parameters of columns T-402 and T-403

Table 3.

Параметры Parameters	Значение The value	
	Колонна Т-402 Column T-402	параметра of the parameter Колонна Т-403 Column T-403
Число тарелок Number of plates	50	70
Давление верха, кПа Top pressure, kPa	900	400
Давление куба, кПа Cube pressure, kPa	1000	600
Температура верха, ° C Top temperature, ° C	190	200
Температура куба, ° C Cube temperature, ° C	267	259
Высота колонны, м Column height, m	25,0	35,0
Диаметр колонны, м Column diameter, m	3,4	3,4

Таблица 4.
Компонентный состав суммарных ксилолов

Table 4.

The component composition of total xylenes

Table 4.

Компоненты Components	Содержание, % масс. Content, % by weight
Толуол Toluene	0,03
23-Мгексан 23-Mhexane	следы traces
2-Мгептан 2-Mheptane	следы traces
н-Октан n-Octane	следы traces
Этилбензол E-Benzene	0,77
м-Ксилол m-Xylene	43,38
п-Ксилол p-Xylene	16,24
о-Ксилол o-Xylene	38,25
н-Нонан n-Nonane	0,95
тр- С3 = Бензол tr-C3 = Benzene	0,38
Нафталин Naphthalene	следы traces
Итого Total	100,00

Для промышленной реализации предложенного технологического узла необходимо смонтировать узел вторичной ректификации, состоящий из двух колонн, где в качестве подогревателей куба колонн будут использоваться ребойлеры. Расход суммарных ксилолов будет контролироваться при помощи регулирующего клапана, зависящего от показателя расхода, а для более точного анализа необходима установка поточного анализатора содержания ароматических углеводородов, в том числе ксилолов.

Среди рассмотренных выше возможных схем вторичной ректификации риформата наибольшую эффективность показали схемы с применением каскада колонн (рисунок 5) и сложная колонна со стриппинг-секцией (рисунок 4). В обоих вариантах чистота товарного продукта (ксилольная фракция) составляла более 97%. Однако аппаратное оформление сложной колонны со стриппинг-секцией является менее предпочтительной, так как в процессе эксплуатации для обеспечения чёткости ректификации потребуется поддержание одинаковых давлений, а также усложняются схемы регулирования.

Для оценки возможности использования схемы, предложенной на рисунке 5, был проведён расчёт октанового числа стабильного риформата после выделения 35% ксилольной фракции от общего количества ксилолов. Установлено, что октановое число снизится в среднем на 0,4–0,5 пунктов, что незначительно повлияет на итоговый показатель автомобильного бензина

при компаундировании, при этом получается дополнительное количество товарного продукта (ксилолов).

По данным рынка базовых продуктов нефтехимии [19, 20] спрос и стоимость ксилольной фракции имеет тенденцию непрерывного роста. Выполненные экономические расчёты с помощью программного обеспечения Aspen PIMS показали, что, учитывая стоимость проектно-исследовательских работ, поставку материально-технических ресурсов, а также затраты на строительно-монтажные работы, срок окупаемости предлагаемого проекта составит 3,5 года.

Заключение

Анализ состава стабильного риформата установки CCR, а также выпускаемых автомобильных бензинов показал, что на ряде промышленных предприятий частичное извлечение суммарных ксилолов из риформата позволит получать как автомобильные бензины различных марок, так и важные продукты нефтехимии – ксилолы, которые можно применять как товарный продукт в качестве растворителей или направлять их на нефтехимические производства для получения других компонентов.

Предложена технологическая схема блока вторичной ректификации стабильного риформата, подобраны оптимальные режимы колонн, которые показали свою адекватность. Также были подобраны оптимальные направления потоков и предложены решения по управлению технологическим процессом.

Литература

- 1 Капизова Н.Б., Каратун О.Н. Выделение ароматических углеводородов из риформата смешанным экстрагентом // Технологии нефти и газа. 2012. № 5. С. 12–13.
- 2 Zhengxi Y.U. et al. Research progress and development trend in para-xylene production technology // Chemical Industry and Engineering Progress. 2020. V. 39. №. 12. P. 4984.
- 3 Каратун О.Н., Капизова Н.Б. Выделение ароматических углеводородов из катализата риформинга // Актуальные инженерные проблемы химических и нефтехимических производств: материалы Всероссийской научно-практической конференции. Нижнекамск: ФГБОУ ВПО «КНИГУ», 2013. С. 36–38.
- 4 Козин В.Г., Мухамадиев А.А. Термодинамическое и физико-химическое исследование смешанных растворителей // Нефтехимия. 2002. Т. 42. №. 4. С. 311–316.
- 5 Коронатов Н.Н., Кузичкин Н.В., Федоров В.И. Выбор режимных параметров колонн блока ректификации установок суммарных ксилолов с целью получения целевой фракции оптимального состава // Химические науки. Приоритетные научные направления: от теории к практике. 2014 С. 122–128.
- 6 Schleiffelder M., Staudt-Bickel C. Crosslinkable copolyimides for the membrane-based separation of p-/o-xylene mixtures // Reactive and Functional Polymers. 2001. V. 49. №. 3. P. 205–213.
- 7 Masakazu H.Zh. Molecularly imprinted cellulose membranes for pervaporation separation of xylene isomers // Yoshikawa Journal of Membrane Science. 2015. № 478. P. 148–154.
- 8 Durdáková T.-M. et al. Comparison of pervaporation and perstraction for the separation of p-xylene/m-xylene mixtures using PDMS and CTA membranes // Separation and Purification Technology, 2021. V. 274. P.118986.
- 9 Ахметов С.А. Технология глубокой переработки нефти и газа: учебное пособие для вузов. Уфа: Гилем, 2002. 672 с.
- 10 Коронатов Н.Н., Кузичкин Н.В., Федоров В.И. Влияние фракционного состава сырья ксилольного риформинга на степень ароматизации углеводородов C8 // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2013. № 19. С. 75–77.
- 11 Lee J.Y., Kim Y.H., Hwang K.S. Application of a fully thermally coupled distillation column for fractionation process in naphtha reforming plant // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 2004. V. 43. №. 4. P. 495–501

- 12 Kim Y.H., Choi D.W., Hwang K.S. Industrial application of an extended fully thermally coupled distillation column to BTX separation in a naphtha reforming plant // Korean Journal of Chemical Engineering. 2003. V. 20. P. 755–761.
- 13 Polovina S., Herceg S., Šarac A.N.A.G. Designing a divided wall column // Petroleum Technology Quarterly. 2016. V. 21. №. 1. P. 89–99.
- 14 Kalita R., Kockler D., Ignat R-M. Use of Dividing Wall Columns for Process Intensification // Chemical Engineering. 2018. V. 69.
- 15 Pishnamazi M., Taghvaie Nakhjir, A., Rezakazemi M., Marjani A. et al. Mechanistic modeling and numerical simulation of axial flow catalytic reactor for naphtha reforming unit // Plos one. 2020. V. 15. №. 11. P. e0242343.
- 16 Baroutaji A, Wilberforce T, Ramadan M, Olabi AG. Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology in the aviation and aerospace sectors // Renew Sustain Energy Rev. 2019. V. 106. P. 31–40. doi: 10.1016/j.rser.2019.02.022
- 17 Oh Y.S., Nam J.H. A numerical study on the active reaction thickness of nickel catalyst layers used in a low-pressure steam methane reforming process // Int. J. Hydrogen Energy. 2021. V. 46. P. 7712–7721. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.11.280
- 18 Wang Q., Xue M., Lin B Le, Lei Z., Zhang Z. Well-to-wheel analysis of energy consumption, greenhouse gas and air pollutants emissions of hydrogen fuel cell vehicle in China // J. Clean. Prod. 2020. V. 275. P. 123061. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123061
- 19 Волкова А.В. Рынок базовых продуктов нефтехимии: олефины и ароматические углеводороды // Высшая школа экономики. 2019. 70 с.
- 20 Shi Q. et al. A review of advances in production and separation of xylene isomers // Chemical Engineering and Processing-Process Intensification. 2021. V. 169. P. 108603.

References

- 1 Kapizova N.B., Karatun O.N. Separation of aromatic hydrocarbons from reformat with a mixed extractant. Oil and Gas Technologies. 2012. no. 5. pp. 12–13. (in Russian).
- 2 Zhengxi Y.U. et al. Research progress and development trend in para-xylene production technology. Chemical Industry and Engineering Progress. 2020. vol. 39. no. 12. pp. 4984.
- 3 Karatun O.N., Kapizova N.B. Separation of aromatic hydrocarbons from reforming catalyate. Actual engineering problems of chemical and petrochemical industries: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference. Nizhnekamsk, FGBOU VPO "KNIGU", 2013. pp. 36-38. (in Russian).
- 4 Kozin V.G., Mukhamadiev A.A. Thermodynamic and physicochemical study of mixed solvents. Petrochemistry. 2002. vol. 42. no. 4. pp. 311-316. (in Russian).
- 5 Koronotov N.N., Kuzichkin N.V., Fedorov V.I. Selection of regime parameters of columns of the rectification block of the total xylenes unit in order to obtain the target fraction of optimal composition. Chemical sciences. Priority scientific directions: from theory to practice. 2014 pp. 122–128. (in Russian).
- 6 Schleiffelder M., Staudt-Bickel C. Crosslinkable copolyimides for the membrane-based separation of p/o-xylene mixtures. Reactive and Functional Polymers. 2001. vol. 49. no. 3. pp. 205-213.
- 7 Masakazu H.Zh. Molecularly imprinted cellulose membranes for pervaporation separation of xylene isomers. Yoshikawa Journal of Membrane Science. 2015. no. 478. pp. 148–154.
- 8 Durd'áková T.-M. et al. Comparison of pervaporation and perstraction for the separation of p xylene/m xylene mixtures using PDMS and CTA membranes. Separation and Purification Technology, 2021. vol. 274. pp.118986.
- 9 Akhmetov S.A. Technology of deep oil and gas processing: a textbook for universities. Ufa, Gilem, 2002. 672 p. (in Russian).
- 10 Koronotov N.N., Kuzichkin N.V., Fedorov V.I. Influence of fractional composition of xylene reforming feedstock on the degree of aromatization of C8 hydrocarbons. Bulletin of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University). 2013. no. 19. p. 75–77. (in Russian).
- 11 Lee J.Y., Kim Y.H., Hwang K.S. Application of a fully thermally coupled distillation column for fractionation process in naphtha reforming plant. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 2004. vol. 43. no. 4. pp. 495–501
- 12 Kim Y.H., Choi D.W., Hwang K.S. Industrial application of an extended fully thermally coupled distillation column to BTX separation in a naphtha reforming plant. Korean Journal of Chemical Engineering. 2003. vol. 20. pp. 755–761.
- 13 Polovina S., Herceg S., Šarac A.N.A.G. Designing a divided wall column. Petroleum Technology Quarterly. 2016. vol. 21. no. 1. pp. 89–99.
- 14 Kalita R., Kockler D., Ignat R-M. Use of Dividing Wall Columns for Process Intensification. Chemical Engineering. 2018. vol. 69.
- 15 Pishnamazi M., Taghvaie Nakhjir, A., Rezakazemi M., Marjani A. et al. Mechanistic modeling and numerical simulation of axial flow catalytic reactor for naphtha reforming unit. Plos one. 2020. vol. 15. no. 11. pp. e0242343.
- 16 Baroutaji A, Wilberforce T, Ramadan M, Olabi AG. Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology in the aviation and aerospace sectors. Renew Sustain Energy Rev. 2019. vol. 106. pp. 31–40. doi: 10.1016/j.rser.2019.02.022
- 17 Oh Y.S., Nam J.H. A numerical study on the active reaction thickness of nickel catalyst layers used in a low-pressure steam methane reforming process. Int. J. Hydrogen Energy. 2021. vol. 46. pp. 7712–7721. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.11.280
- 18 Wang Q., Xue M., Lin B Le, Lei Z., Zhang Z. Well-to-wheel analysis of energy consumption, greenhouse gas and air pollutants emissions of hydrogen fuel cell vehicle in China. J. Clean. Prod. 2020. vol. 275. pp. 123061. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123061
- 1919 Volkova A.V. Market of basic petrochemical products: olefins and aromatic hydrocarbons. Higher School of Economics. 2019. 70 p. (in Russian).
- 20 Shi Q. et al. A review of advances in production and separation of xylene isomers. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification. 2021. vol. 169. pp. 108603.

Сведения об авторах

Павел И. Трифонов магистрант, кафедра химии и химической технологии, Самарский государственный технический университет, филиал в г. Новокуйбышевске, ул. Миронова, 5, г. Новокуйбышевск, 446200, Россия, svropov2018@ya.ru

Сергей В. Попов к.т.н., доцент, кафедра химии и химической технологии, Самарский государственный технический университет, филиал в г. Новокуйбышевске, ул. Миронова, 5, г. Новокуйбышевск, 446200, Россия, svropov2018@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-0533-9049>

Information about authors

Pavel I. Trifonov master student, chemistry and chemical technology department, Samara State Technical University, branch in Novokuibyshevsk, st. Mironova, 5, Novokuibyshevsk, 446200, Russia, svpopov2018@ya.ru

Sergey V. Popov Cand. Sci. (Engin.), associate professor, chemistry and chemical technology department, Samara State Technical University, branch in Novokuibyshevsk, st. Mironova, 5, Novokuibyshevsk, 446200, Russia, svpopov2018@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-0533-9049>

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 22/07/2024	После редакции 14/08/2024	Принята в печать 02/09/2024
Received 22/07/2024	Accepted in revised 14/08/2024	Accepted 02/09/2024