

Получение высококонцентрированных пропиленовой и пропановой фракций на АГФУ FCC

Сергей В. Попов¹ svpopov2018@ya.ru  0000-0003-0533-9049
Нина А. Плешакова¹ napleshakova63@ya.ru .
Рафаэль А. Махмудов¹ svpopov2018@ya.ru .

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

Аннотация. Пропан-пропиленовая фракция имеет широкое использование в промышленности, например в крупнотоннажном процессе алкилирования бензола пропиленом в производстве фенола-аcetона. При этом практический интерес представляет ректификационное концентрирование пропилена из пропан-пропиленовой фракции, вырабатываемой на абсорбционной газофракционирующей установке в составе установки флюид-каталитического крекинга. С целью получения фракции с высоким содержанием пропилена показана возможность включения в технологическую схему АГФУ FCC дополнительной ректификационной колонны для выделения из пропан-пропиленовой фракции пропиленовой (содержание пропилена 99,5% масс.) и пропановой (содержание пропана 98,1 % масс.) фракций. Исследования проводились с использованием моделирующей системы Honeywell UniSim Design. Параметры компонентов фракций рассчитывались по методу Peng-Robinson. Для оценки флегмового числа тарелки проектируемой ректификационной колонны номера оптимальной тарелки питания и соответствующего флегмового числа моделировали протекание процесса разделения пропиленовой и пропановой фракций в колонне Short Cut Distillation. Полученные результаты воспроизведены на ректификационной колонне, содержащей 90 трёх-поточных клапанных тарелок (эффективность контактного устройства принята 0,8). Оптимальные технологические и конструкционные параметры ректификационной колонны, обеспечивающие чёткое разделение пропиленовой и пропановой фракций, имеют следующие значения: давление верха и низа колонны $R_{\text{верх}}=1600$ кПа и $R_{\text{низ}}=1650$ кПа; температура в конденсаторе $T_{\text{кон}}=38,87$ °C и в ребойлере $T_{\text{реб}}=48,52$ °C; флегмовое число $R=11$; тарелка питания $N_p=34$; расстояние между тарелками 500мм. Приведен температурный профиль по высоте колонны. Модель ректификационной колонны может использоваться для оценки режимных и конструкционных параметров при её промышленном проектировании. Включение предлагаемой колонны в технологическую схему АГФУ FCC позволит получить на предприятии дополнительную экономическую выгоду.

Ключевые слова: каталитический крекинг, абсорбционная газофракционирующая установка, пропан-пропиленовая фракция, ректификация, моделирование, Honeywell UniSim Design

Production of highly concentrated propylene and propane fractions at the FCC AGFU

Sergey V. Popov¹ svpopov2018@ya.ru  0000-0003-0533-9049
Nina A. Pleshakova¹ napleshakova63@ya.ru .
Rafael A. Makhmudov¹ svpopov2018@ya.ru .

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

Abstract. The propane-propylene fraction is widely used in industry, for example in the large-scale process of alkylation of benzene with propylene in the production of phenol-acetone. At the same time, the rectification concentration of propylene from the propane-propylene fraction produced at an absorption gas fractionation plant as part of a fluid catalytic cracking plant is of practical interest. In order to obtain a fraction with a high propylene content, it is shown that an additional distillation column can be included in the technological scheme of the FCC AGFU to separate propylene (propylene content 99.5% by weight) and propane (propane content 98.1% by weight) fractions from propane-propylene fractions. The research was carried out using the Honeywell UniSim Design modeling system. The parameters of the fraction components were calculated using the Peng-Robinson method. To estimate the actual number of plates of the projected distillation column, the number of the optimal feeding plate and the corresponding phlegm number, the process of separation of propylene and propane fractions in the Short Cut Distillation column was simulated. The results obtained were reproduced on a distillation column containing 90 three-flow valve plates (the efficiency of the contact device was assumed to be 0.8). The optimal technological and structural parameters of the distillation column, which ensure a clear separation of propylene and propane fractions, have the following values: pressure of the top and bottom of the column $R_{\text{top}}=1600$ kPa and $R_{\text{bottom}}=1650$ kPa; temperature in the condenser $T_{\text{con}}=38.87$ °C and in the reboiler $T_{\text{reb}}=48.52$ °C; phlegm number $R=11$; power plate $N_p=34$; the distance between the plates is 500mm. The temperature profile of the column height is given. The rectification column model can be used to evaluate the operating and structural parameters in its industrial design. The inclusion of the proposed column in the technological scheme of the FCC AGFU will allow additional economic benefits to be obtained at the enterprise.

Keywords: catalytic cracking, absorption gas fractionation unit, propane-propylene fraction, rectification, modeling, Honeywell UniSim Design

Введение

Процесс каталитического крекинга продолжает иметь большое значение для глубокой переработки нефти, обеспечивая получение из малоценного тяжёлого сырья компонентов бензина и дизельного топлива, углеводородные газы – сырья нефтехимических процессов.

Для цитирования

Попов С.В., Плешакова Н.А., Махмудов Р.А. Получение высококонцентрированных пропиленовой и пропановой фракций на АГФУ FCC // Вестник ВГУИТ. 2024. Т. 86. № 1. С. 219–226. doi:10.20914/2310-1202-2024-1-219-226

В связи с этим, для многих заводов установка каталитического крекинга является ключевой в плане достижения рентабельности работы всего предприятия [1–3].

Наличие в их составе газофракционирующей установки позволяют получать из нефтезаводских газов углеводородные фракции высокой

For citation

Popov S.V., Pleshakova N.A., Makhmudov R.A. Production of highly concentrated propylene and propane fractions at the FCC AGFU. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2024. vol. 86. no. 1. pp. 219–226. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2024-1-219-226

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

чистоты или индивидуальные легкие углеводороды, которые являются не только экологически чистым топливом, но и сырьем для получения спиртов, полипропилена, МТБЭ, бутадиенового каучука и т. д.

Пропан-пропиленовая фракция (ППФ), вырабатываемая на абсорбционной газодиффузионной установке (АГФУ) в составе установки флюид-каталитического крекинга (ФСК), имеет широкое использование в промышленности, например, в крупнотоннажном процессе алкилирования бензола пропиленом в производстве фенола-ацетона.

Отметим, что особо важное значение имеет присутствие пропилена в ППФ. В настоящее время отмечается интенсивный рост спроса на пропилен, основным способом промышленного получения которого является пиролиз жидкого углеводородного сырья. В связи с этим актуальным является поиск возможных технологических вариантов по увеличению выпуска пропилена. Для решения этого вопроса разработан ряд модификаций каталитического крекинга с увеличенным выходом пропилена [4], разрабатываются присадки, используемые в катализаторах и обеспечивающие увеличение выхода лёгких олефинов [5–7].

В работах [8–10] с целью получения пропилена ППФ предлагается использовать в виде дополнительного источника сырья на блоке газоразделения производства этилена-пропилена.

Важным направлением получения пропилена, имеющим практический и экономический интерес, представляется ректификационное концентрирование пропилена из пропан-пропиленовой фракции.

В исследовании [11] показано фракционирование ППФ диоксидом углерода при умеренных температурах с помощью имитируемого движущегося слоя газовой фазы в цеолите. Возможность достаточно чёткого отделения пропилена от пропана путем экстрактивной дистилляции с использованием водного раствора N-метил-2-пирролидона в качестве разделяющего агента показана в работе [12]. Для оптимизации работы ректификационной колонны разделения ППФ в статье [13] предлагается динамическая модель с использованием промышленного контроллера.

Разделение ректификацией с применением углеводородных разбавителей и / или селективной абсорбцией с частичной отпаркой в кипятильнике потока, который возвращают в зону ректификации или абсорбции, обеспечивает содержание пропилена выше 97% мас. [14]. Способ разделения ППФ пиролиза в двух ректификационных колоннах предлагается в исследовании [15–20], однако содержание пропилена в пропиленовой фракции

составляет 90% масс. В работе [15] показано, что для схемы разделения ППФ, состоящей из двух колонн, расчетным методом определены оптимальные технологические режимы, которые обеспечивают содержание пропилена 99,1% масс. и пропана не более 0,8% масс. в пропиленовой фракции, а в пропановой фракции пропилена – не более 0,03% масс.

Цель работы – исследование возможности получения высококонцентрированных пропиленовой (содержание пропилена не ниже 99,5% масс.) и пропановой фракций на АГФУ ФСК.

Методы

Объектом настоящего исследования является АГФУ в составе ФСК. Сырьё АГФУ – жирный газ (ЖГ), выделяемый из состава реакционной массы на фракционирующей колонне ФСК. Операционная схема АГФУ показана на рисунке 1.

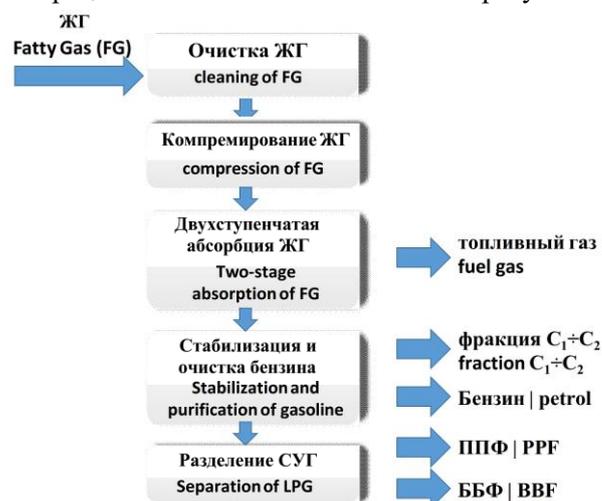


Рисунок 1. Операционная схема АГФУ
Figure 1. The operating scheme of the AGFU

ЖГ поступает на узел «Очистка ЖГ» под нижнюю тарелку аминового абсорбера, где обеспечивается его очистка от сероводорода раствором моноэтаноламина (МЭА) и отмывка от примеси МЭА водой. ЖГ с верха аминового абсорбера подаётся на узел «Компримирование ЖГ» и далее на контур «Двухступенчатая абсорбция ЖГ», предназначенный для извлечения из ЖГ углеводородов C3+ с использованием в качестве абсорбента нестабильного бензина и лёгкого газойля в первичном и вторичном абсорберах соответственно. «Сухой газ» направляется в топливную сеть, а насыщенные абсорбенты подаются на узел «Стабилизация и очистка бензина», после чего фракция углеводородов C3+ поступает на блок разделения сжиженных углеводородных газов «Разделение СУГ» для ректификационного фракционирования и получения целевых пропан-пропиленовой (ППФ) и бутан-бутиленовой (ББФ) фракций.

Принципиальная схема блока разделения СУГ приведена на рисунке 2.

Ректификационная колонна К-06 обеспечивает разделение потока СУГ, подаваемого на 20-ую тарелку (в колонне 37 клапанных тарелок), на ППФ и ББФ фракции. Рассматриваемая нами фракция ППФ отбирается дистиллятом с верха колонны.

Для разработки узла разделения ППФ в моделирующей среде UniSim Design нами были использованы промышленные данные, полученные на действующей установке.

Определение оптимальных конструктивных и режимных параметров проведено на колонне Short Cut Distillation (рисунок 3). Результатом расчётов является формирование пропиленовой (поток ппфВ) и пропановой (поток ппфН) фракций с необходимыми значениями конструктивных и режимных параметров колонны К-доп ШК. Сведения о потоке питания колонны приводятся в таблице 1. Его давление компремировано с 895 кПа до 1750 кПа. Рассчитанные технологические режимы и компонентный состав дистиллята и кубового остатка показаны в таблицах 2, 3. Оценки конструктивных и режимных параметров колонны сведены в таблице 4.

Анализ полученных результатов показывает, что в пропиленовой фракции (дистиллят)

содержание пропилена достигает 99,5% масс. при флегмовом числе $R = 11$, минимальном числе теоретических тарелок $N_{min} = 62$, актуальном числе тарелок $N_T = 93$ и тарелке питания $N_P = 31$ (таблица 4). При давлении верха и низа колонны $R_{верх} = 1600$ кПа и $R_{низ} = 1650$ кПа необходимы температуры в конденсаторе $T_{кон} = 38,87$ °С и в ребойлере $T_{реб} = 48,52$ °С.

Результаты и обсуждение

Для расчёта проектируемой ректификационной колонны Кдоп принимаем, что в колонне будут использоваться контактные устройства с эффективностью 0,8. Схема рассчитываемой колонны показана на рисунке 4. Поток пропан-пропиленовой фракции из узла разделения СУГ (поток ППФ-АГФУ) подаётся на 34-ую тарелку, общее количество трёх-поточных клапанных тарелок – 90. Отметим, что поточность колонны определена по результатам расчёта конструктивных параметров колонны. Технологические параметры и компонентный состав потока питания колонн Кдоп и К-доп ШК аналогичны (таблица 1).

В качестве дистиллята отбирается пропиленовая фракция (поток фрС3Н6), кубовый остаток – пропановая фракция (поток фрС3Н8).

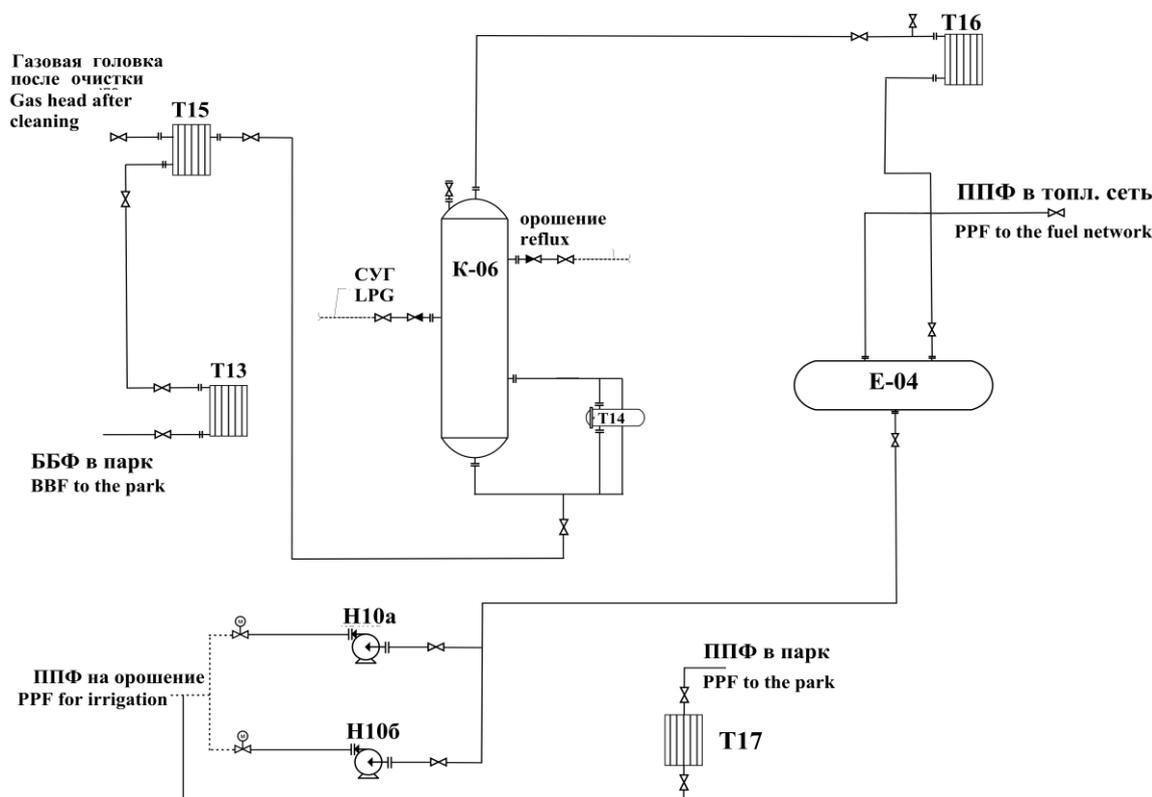


Рисунок 2. Принципиальная схема блока разделения СУГ: T13, T15, T17 – теплообменники; K06 – колонна разделения фракции углеводородов C₃-C₄; E04 – рефлюксная емкость; T16 – конденсатор; T14 – термосифонный ребойлер; H10a, H106 – насосы

Figure 2. Schematic diagram of the LPG separation unit: T13, T15, T17 – heat exchangers; K06 – hydrocarbon fraction C₃-C₄ rectification column; E04 – reflux tank; T16 – condenser; T14 – thermosiphon reboiler; H10a, H106 – pumps

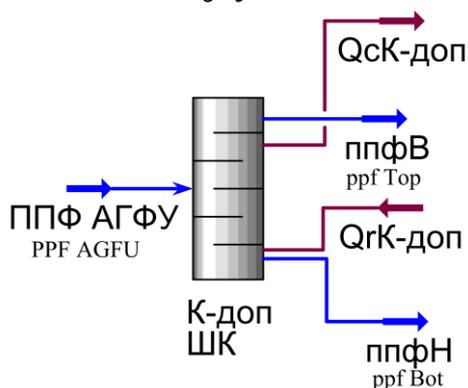


Рисунок 3. Схема колонны Short Cut Distillation
Figure 3. Diagram of the Short Cut Distillation column

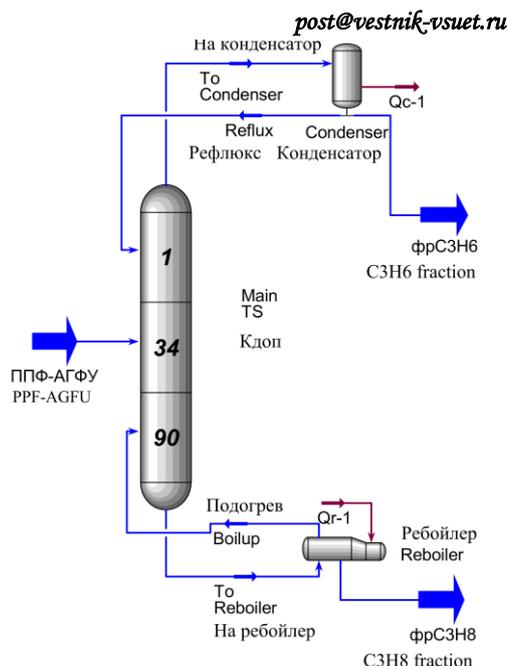


Рисунок 4. Схема ректификационной колонны Кдоп
Figure 4. The scheme of the distillation column Кдоп

Технологические параметры (а) и компонентный состав (б) питания колонны К-доп ШК (поток ППФ АГФУ)

Таблица 1.

Technological parameters (a) and component composition (b) supply of the К-доп ШК column (PPF AGFU flow)

Table 1.

Название потока Stream Name	ППФ АГФУ PPF AGFU
Доля паровой фазы Vapour / Phase Fraction	0,0000
Температура [°C] Temperature [°C]	19,32
Давление [кПа] Pressure [kPa]	1750
Молярный поток [кмоль/ч] Molar Flow [kmole/h]	244,5
Массовый поток [кг/ч] Mass Flow [kg/h]	1,042e+004
Объёмный расход [м³/ч] Std Ideal Lig Vol Flow [m³h]	20,14
Молярная энтальпия [кДж/кгмоль] Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-2,662e+004
Молярная энтропия [кДж/кгмоль °C] Molar Entropy [kJ/kgmole °C]	118,7
Тепловой поток [кДж/ч] Heat Flow [kJ/h]	-6,508e+006

Название углеводорода The Name of the hydrocarbon	масс. доля mass fractions
Водород Hydrogen	0,000000
Метан Methane	0,000001
Этан Ethane	0,000007
Этилен Ethylene	0,000001
Пропан Propane	0,252997
Пропилен Propene	0,742993
н-Бутан n-Butane	0,000300
Изобутан i-Butane	0,002400
1-Бутен 1-Butene	0,000500
Изобутен i-Butene	0,000800
н-Пентан n-Pentane	0,000001
Итого Total	1,000000

(a) (b)

Технологические параметры (а) и компонентный состав (б) дистиллята колонны К-доп ШК (поток ппфВ)

Таблица 2.

Technological parameters (a) and component composition (b) of the distillate of the К-доп ШК column (ppf Top stream)

Table 2.

Название потока Stream Name	ппфВ ppf Top
Доля паровой фазы Vapour / Phase Fraction	0,0000
Температура [°C] Temperature [°C]	38,87
Давление [кПа] Pressure [kPa]	1600
Молярный поток [кмоль/ч] Molar Flow [kmole/h]	184,7
Массовый поток [кг/ч] Mass Flow [kg/h]	7775
Объёмный расход [м³/ч] Std Ideal Lig Vol Flow [m³h]	14,93
Молярная энтальпия [кДж/кгмоль] Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	5853
Молярная энтропия [кДж/кгмоль °C] Molar Entropy [kJ/kgmole °C]	107,1
Тепловой поток [кДж/ч] Heat Flow [kJ/h]	1,081e+006

Название углеводорода The Name of the hydrocarbon	масс. доля mass fractions
Водород Hydrogen	0,000000
Метан Methane	0,000001
Этан Ethane	0,000009
Этилен Ethylene	0,000001
Пропан Propane	0,005238
Пропилен Propene	0,994750
н-Бутан n-Butane	0,000000
Изобутан i-Butane	0,000000
1-Бутен 1-Butene	0,000000
Изобутен i-Butene	0,000000
н-Пентан n-Pentane	0,000000
Итого Total	1,000000

(a) (b)

Таблица 3.
Технологические параметры (а) и компонентный состав (в) кубового остатка колонны **К-доп ШК** (поток **ппфН**)
Table 3.
Technological parameters (a) and component composition (b) of the cubic residue of the **К-доп ШК** column
(**ppf Bot** stream)

Название потока Stream Name	ппфН ppf Bot
Доля паровой фазы Vapour / Phase Fraction	0,0000
Температура [°C] Temperature [°C]	48,52
Давление [кПа] Pressure [kPa]	1650
Молярный поток [кмоль/ч] Molar Flow [kmole/h]	59,76
Массовый поток [кг/ч] Mass Flow [kg/h]	2645
Объёмный расход [м³/ч] Std Ideal Lig Vol Flow [m³h]	5,210
Молярная энтальпия [кДж/кгмоль] Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-1,165e+005
Молярная энтропия [кДж/кгмоль °C] Molar Entropy [kJ/kgmole °C]	183,5
Тепловой поток [кДж/ч] Heat Flow [kJ/h]	-6,963e+006

Название углеводорода The Name of the hydrocarbon	масс. доля mass fractions
Водород Hydrogen	0,000000
Метан Methane	0,000000
Этан Ethane	0,000000
Этилен Ethylene	0,000000
Пропан Propane	0,981384
Пропилен Propene	0,002853
н-Бутан n-Butane	0,001182
Изобутан i-Butane	0,009456
1-Бутен 1-Butene	0,001970
Изобутен i-Butene	0,003152
н-Пентан n-Pentane	0,000004
Итого Total	1,000000

(a) (b)

Таблица 4.
Оценки конструкционных и режимных параметров колонны **К-доп ШК**

Table 4.
Estimates of structural and operational parameters of the **К-доп ШК** column

Наименование Description	Значение Value
Минимальное флегмовое число Minimum Reflux	6,602
Минимальное число тарелок Minimum Trays	61,95
Актуальное число тарелок Actual Trays	93,48
Оптимальная тарелка питания Optimal Feed	31,55
Нагрузка конденсатора, кДж/ч Condenser Duty, kJ/h	3,293e+007
Нагрузка ребойлера, кДж/ч Reboiler Duty, kJ/h	3,356e+007
Давление в конденсаторе, кПа Condenser pressure, kPa	1600
Давление в ребойлере, кПа Reboiler pressure, kPa	1650
Температура в конденсаторе, °C Condenser temperature, °C	38,87
Температура в ребойлере, °C Reboiler temperature, °C	48,52
Заданное флегмовое число External Reflux	11,00

Расчёты показали, что на ректификационной колонне Кдоп полностью воспроизводятся режимы и компонентные составы технологических потоков, полученные для колонны К-доп ШК и приведенные в таблице 2 и таблице 3.

Температурный профиль по высоте колонны Кдоп показан на рисунке 5. На рисунке 6 показана ASTM D86 разгонка рассчитанных пропиленовой фр.С3Н6 и пропановой фр.С3Н8 фракций. Видно, что на рассматриваемой колонне достигается чёткое разделение ППФ: содержание пропана в пропиленовой фракции составляет не более 0,5% масс. (на графике имеем практически горизонтальную «прямую» выкипания фракции), а содержание пропилена в пропановой фракции не более 0,3% масс. (на графике отклонение от горизонтального положения кривой разгонки объясняется присутствием в питании колонны порядка 1,5% масс. н-бутана, изобутана, 1-бутена, изобутена и

н-пентана, которые после ректификации вошли в состав пропановой фракции).

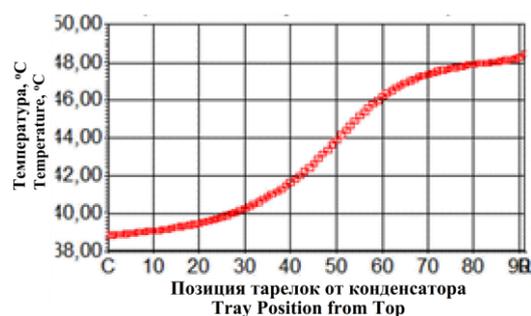


Рисунок 5. Температурный профиль по высоте колонны **Кдоп** (распечатка в моделирующей среде)

Figure 5. Temperature profile according to the height of the **Кдоп** column (printout in a modeling environment)

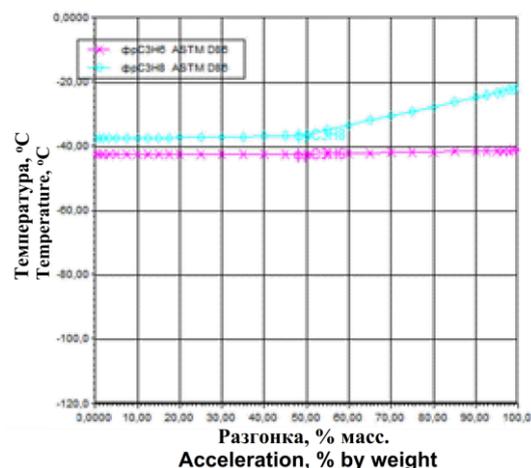


Рисунок 6. ASTM D86 разгонка рассчитанных пропиленовой фр.С3Н6 и пропановой фр.С3Н8 фракций (распечатка в моделирующей среде)

Figure 6. ASTM D86 overlocking of calculated propylene **C3H6 fraction** and propane **C3H8 fraction** (printout in a modeling environment)

В таблице 5 приведены рассчитанные конструкционные параметры колонны Кдоп. Оптимальным для исследуемого узла является: - использование ректификационной колонны с одинаковым диаметром 3 м по её высоте; - применение клапанных трёх-поточных тарелок; - расстояние между тарелками 500 мм.

Расчёты показали, что концентрирование пропилена в пропиленовой фракции выше 99,5% масс. приведёт к заметному увеличению числа тарелок и требуемого диаметра колонны.

Таблица 5.
Рассчитанные конструкционные параметры колонны Кдоп

Table 5.
Calculated structural parameters of the Кдоп column

Тип тарелки Internals	Клапанные Valve
Диаметр [м] Diameter [m]	3,048
Max затопление [%] Max Flooding [%]	79,39
X-поверхность [м ²] X-Area [m ²]	7,297
Высота [м] Height [m]	45,00
ДельтаР [кПа] DeltaP [kPa]	44,00
Поточность Number of Flow Paths	3
Длина потока [мм] Flow Length [mm]	749,3
Ширина потока [мм] Flow Width [mm]	2611
Max DP/тарелка [кПа] Max DP/Tray [kPa]	0,497
Расстояние между тарелками [мм] Tray Spacing [mm]	500,0
Общая длина слива [мм] Total Weir Length [mm]	7476
Высота слива [мм] Weir Height [mm]	50,80
Активная поверхность [м ²] Active Area [m ²]	5,870
Свободное сечение [м ²] Hole Area [m ²]	0,8981

Отметим, что при включении в технологическую схему АГФУ дополнительной колонны Кдоп появляется возможность получить из ППФ пропиленовую и пропановую фракции, которые могут быть реализованы как товарные продукты.

Заключение

Одним из возможных направлений совершенствования АГФУ является расфракционирование целевой ППФ, что позволит получить новые более дорогие и перспективные на рынке товарные углеводородные фракции, использование которых в других химических синтезах даёт возможность повышения селективности процессов и удельной производительности реакционных узлов.

Приведенными результатами исследований показана возможность включения в технологическую схему АГФУ дополнительной ректификационной колонны для выделения из ППФ пропиленовой (содержание пропилена 99,5% масс.) и пропановой (содержание пропана 98,1% масс.). Рассчитаны и приведены оптимальные технологические и конструкционные параметры ректификационной колонны Кдоп, обеспечивающей чёткое разделение пропиленовой и пропановой фракций.

Модель ректификационной колонны может использоваться для оценки режимных и конструкционных параметров при её промышленном проектировании. Включение предлагаемой колонны в технологическую схему АГФУ FCC позволит получить на предприятии дополнительную экономическую выгоду.

Литература

- 1 Ершов Д.С., Хафизов А.Р., Мустафин И.А., Станкевич К.Е. и др. Современное состояние и тенденции развития процесса каталитического крекинга // *Фундаментальные исследования*. 2017. № 12. С. 282-285.
- 2 Ганцев А.В., Виниченко М.В. Современное состояние и перспективы развития процесса каталитического крекинга нефтяного сырья // *Universum: Химия и биология*. 2019. № 12(66). URL: <http://7universum.com/ru/nature/archive/item/8266>
- 3 Голубева И.А., Крючков М.В. Нефтегазохимия в России: состояние, проблемы, перспективы развития // *Химия и технология топлив и масел*. 2021. № 1. С. 49-56.
- 4 Khande A.R., Dasila P.K., Majumder S., Maity P. et al. Recent developments in FCC process and catalysts // *Catalysis for Clean Energy and Environmental Sustainability: Petrochemicals and Refining Processes-Volume 2*. 2021. P. 65-108. doi: 10.1007/978-3-030-65021-6_3
- 5 Wang Y.-Z. Solubility Parameters of Poly (sulfonyldiphenylene phenylphosphonate) and Its Miscibility with Poly (ethylene terephthalate) // *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*. 2013. V. 41. P. 2296-2301. doi: 10.1002/polb.10516
- 6 Xue G., Ji G., Yan H. Morphology and Molecular Motion of Poly (ethylene terephthalate) in Polymer/Oligomer Gel // *Macromolecules*. 2017. V. 31. P. 7706-7711. doi: 10.1021/ma9802576
- 7 Mamudu A., Elehinafe F., Ishola F., Okoro E. et al. Maximizing Olefins Production from Fluid Catalytic Cracking (FCC) Unit Using Zsm-05 Catalyst for the Nigerian Petrochemical Industry // *The United Nations and Sustainable Development Goals*. 2022. P. 205-221. doi: 10.1007/978-3-030-95971-5_16
- 8 Прозорова О.Б., Бурханова Л.Б., Музирова Р.Р., Худайгулова Г.А. Вовлечение пропан-пропиленовой фракции установки каталитического крекинга в сырьё блока газоразделения производства этилена и пропилена // *Электронный научный журнал Нефтегазовое дело*. 2019. № 6. С. 134-149. doi: 10.17122/ogbus-2019-6-134-149
- 9 Артамонова К.В., Прозорова О.Б., Лихачева Н.А., Прозорова С.Ю. Пропан-пропиленовая фракция каталитического крекинга как дополнительный источник сырья для получения пропилена // *Электронный научный журнал Нефтегазовое дело*. 2021. № 3. С. 93-109. doi: 10.17122/ogbus-2021-3-93-109
- 10 Mammadov Z.A. The use of c1-c4 fractions obtained in catalytic cracking and gradual coking units as raw materials for the production of ethylene and propylene in ep-300 complex // *PPOR*. 2023. V. 24. № 3. P. 535-541.

- 11 Seabra R., Dias R.O., Regufe M.J., Ribeiro A.M. et al. Propane and Propylene Separation with Carbon Dioxide at Mild Temperatures by Gas-Phase Simulated Moving Bed in Binderfree Zeolite 13X // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2023. V. 62. №. 32. P. 12600-12612.
- 12 Cruz Valdez J.A., Aviles Martinez A., Vallejo Montesinos J., Perez E. et al. Maximizing Propylene Separation from Propane by Extractive Distillation with Aqueous N-Methyl-2-pyrrolidone as Separating Agent // *Chemical Engineering & Technology*. 2021. V. 44. №. 9. P. 1726-1736. doi: 10.1002/ceat.202100203
- 13 Oliveira-Silva E., de Prada C., Navia D. Simulation platform of an industrial propylene-propane splitter integrated to Advanced Process Control for Real Time Optimization experiments // *IFAC-PapersOnLine*. 2022. V. 55. №. 7. P. 673-678.
- 14 Пат. № 2296736, RU, C07C 7/05, 11/06, 9/08. Способ разделения пропена и пропана / Павлов О.С., Павлов Д.С., Павлов С.Ю. № 20036104239/04; Заявл. 13.02.2006; Опубл. 10.04.2007, Бюл. №10.
- 15 Пат. № 2733380, RU, C07C 7/05, 9/08. Способ выделения пропилена из пропан пропиленовой фракции / Белов Е.А., Белов А.А., Зарипов Р.Т., Минигулов Ф.Г., Сафин Д.Х. № 2020115055; Заявл. 29.04.2020; Опубл. 01.10.2020, Бюл. №28.
- 16 Лошманов С.В., Попов С.В., Хабибрахманова О.В. Оптимизация содержания пропилена в пропан-пропиленовой фракции, подаваемой на алкилирование бензола с целью получения изопропилбензола // *Вестник ВГУИТ*. 2022. Т. 84. №4. С. 157-167. doi: 10.20914/2310-1202-2022-4-157-164
- 17 Palos R., Gutiérrez A., Fernández M.L., Trueba D. et al. Upgrading of heavy coker naphtha by means of catalytic cracking in refinery FCC unit // *Fuel processing technology*. 2020. V. 205. P. 106454.
- 18 Alabdullah M.A., Gomez A.R., Vittenet J., Bendjerou-Sedjerari, A. et al. A viewpoint on the refinery of the future: catalyst and process challenges // *ACS Catalysis*. 2020. V. 10. №. 15. P. 8131-8140. doi: 10.1021/acscatal.0c02209
- 19 Alotibi M.F., Alshammari B.A., Alotaibi M.H., Alotaibi F.M. et al. ZSM-5 zeolite based additive in FCC process: A review on modifications for improving propylene production // *Catalysis Surveys from Asia*. 2020. V. 24. P. 1-10. doi: 10.1007/s10563-019-09285-1
- 20 Le-Phuc N., Tran T.V., Phan T.T., Ngo P.T. et al. Efficient processing of crude oil using direct cracking at high temperatures over modified FCC catalysts // *Petroleum Science and Technology*. 2023. V. 41. №. 24. P. 2391-2401.

References

- 1 Ershov D.S., Khafizov A.R., Mustafin I.A., Stankevich K.E. and others. Current state and development trends of the catalytic cracking process // *Fundamental Research*. 2017. No. 12. pp. 282-285.
- 2 Gantsev A.V., Vinichenko M.V. Current state and prospects for the development of the process of catalytic cracking of petroleum feedstock. *Universum: Chemistry and biology*. 2019. no. 12(66). Available at: <http://7universum.com/ru/nature/archive/item/8266> (in Russian).
- 3 Golubeva I.A., Kryuchkov M.V. Petroleum and gas chemistry in Russia: status, problems, development prospects. *Chemistry and technology of fuels and oils*. 2021. no. 1. pp. 49-56. (in Russian).
- 4 Khande A.R., Dasila P.K., Majumder S., Maity P. et al. Recent developments in FCC process and catalysts. *Catalysis for Clean Energy and Environmental Sustainability: Petrochemicals and Refining Processes-Volume 2*. 2021. pp. 65-108. doi: 10.1007/978-3-030-65021-6_3
- 5 Wang Y.-Z. Solubility Parameters of Poly (sulfonyldiphenylene phenylphosphonate) and Its Miscibility with Poly (ethylene terephthalate). *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*. 2013. vol. 41. pp. 2296-2301. doi: 10.1002/polb.10516
- 6 Xue G., Ji G., Yan H. Morphology and Molecular Motion of Poly (ethylene terephthalate) in Polymer/Oligomer Gel. *Macromolecules*. 2017. vol. 31. pp. 7706-7711. doi: 10.1021/ma9802576
- 7 Mamudu A., Elehinafe F., Ishola F., Okoro E. et al. Maximizing Olefins Production from Fluid Catalytic Cracking (FCC) Unit Using Zsm-05 Catalyst for the Nigerian Petrochemical Industry. *The United Nations and Sustainable Development Goals*. 2022. pp. 205-221. doi: 10.1007/978-3-030-95971-5_16
- 8 Prozorova O.B., Burkhanova L.B., Muzirov R.R., Khudaygulova G.A. Involvement of the propane-propylene fraction of the catalytic cracking unit in the raw materials of the gas separation unit for the production of ethylene and propylene. *Electronic scientific journal Oil and Gas Business*. 2019. no. 6. pp. 134-149. doi: 10.17122/ogbus-2019-6-134-149 (in Russian).
- 9 Artamonova K.V., Prozorova O.B., Likhacheva N.A., Prozorova S.Yu. Propane-propylene fraction of catalytic cracking as an additional source of raw materials for the production of propylene. *Electronic scientific journal Oil and Gas Business*. 2021. no. 3. pp. 93-109. doi: 10.17122/ogbus-2021-3-93-109 (in Russian).
- 10 Mammadov Z.A. The use of c1-c4 fractions obtained in catalytic cracking and gradual coking units as raw materials for the production of ethylene and propylene in ep-300 complex. *PPOR*. 2023. vol. 24. no. 3. pp. 535-541.
- 11 Seabra R., Dias R.O., Regufe M.J., Ribeiro A.M. et al. Propane and Propylene Separation with Carbon Dioxide at Mild Temperatures by Gas-Phase Simulated Moving Bed in Binderfree Zeolite 13X. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2023. vol. 62. no. 32. pp. 12600-12612.
- 12 Cruz Valdez J.A., Aviles Martinez A., Vallejo Montesinos J., Perez E. et al. Maximizing Propylene Separation from Propane by Extractive Distillation with Aqueous N-Methyl-2-pyrrolidone as Separating Agent. *Chemical Engineering & Technology*. 2021. vol. 44. no. 9. pp. 1726-1736. doi: 10.1002/ceat.202100203
- 13 Oliveira-Silva E., de Prada C., Navia D. Simulation platform of an industrial propylene-propane splitter integrated to Advanced Process Control for Real Time Optimization experiments. *IFAC-PapersOnLine*. 2022. vol. 55. no. 7. pp. 673-678.
- 14 Pavlov O.S., Pavlov D.S., Pavlov S.Yu. Method for separating propene and propane. Patent RF, no. 2296736, 2007.
- 15 Belov E.A., Belov A.A., Zariyov R.T., Minigulov F.G., Safin D.Kh. Method for isolating propylene from propane-propylene fraction. Patent RF, no. 2733380, 2020.

16 Loshmanov S.V., Popov S.V., Khabibrakhmanova O.V. Optimization of the propylene content in the propane-propylene fraction fed to the alkylation of benzene to obtain isopropylbenzene. *Proceedings of VSUET*. 2022. vol. 84. no. 4. pp. 157-167. doi: 10.20914/2310-1202-2022-4-157-164 (in Russian).

17 Palos R., Gutiérrez A., Fernández M.L., Trueba D. et al. Upgrading of heavy coker naphtha by means of catalytic cracking in refinery FCC unit. *Fuel processing technology*. 2020. vol. 205. pp. 106454.

18 Alabdullah M.A., Gomez A.R., Vittenet J., Bendjeriou-Sedjerari, A. et al. A viewpoint on the refinery of the future: catalyst and process challenges. *ACS Catalysis*. 2020. vol. 10. no. 15. pp. 8131-8140. doi: 10.1021/acscatal.0c02209

19 Alotibi M.F., Alshammari B.A., Alotaibi M.H., Alotaibi F.M. et al. ZSM-5 zeolite based additive in FCC process: A review on modifications for improving propylene production. *Catalysis Surveys from Asia*. 2020. vol. 24. pp. 1-10. doi: 10.1007/s10563-019-09285-1

20 Le-Phuc N., Tran T.V., Phan T.T., Ngo P.T. et al. Efficient processing of crude oil using direct cracking at high temperatures over modified FCC catalysts. *Petroleum Science and Technology*. 2023. vol. 41. no. 24. pp. 2391-2401.

Сведения об авторах

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>

Нина А. Плешакова к.т.н., доцент, кафедра химии и химической технологии, Самарский государственный технический университет, филиал в г. Новокуйбышевске, ул. Миронова, 5, г. Новокуйбышевск, 446200, Россия, napleshakova63@ya.ru

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

Вклад авторов

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

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>

Nina A. Pleshakova Cand. Sci. (Engin.), associate professor, chemistry and chemical technology department, Samara State Technical University, branch in Novokuibyshevsk, st. Mironova, 5, Novokuibyshevsk, 446200, Russia, napleshakova63@ya.ru

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

Contribution

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

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 17/01/2024	После редакции 14/02/2024	Принята в печать 01/03/2024
Received 17/01/2024	Accepted in revised 14/02/2024	Accepted 01/03/2024