Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ
CHEMICAL TECHNOLOGY
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2022-4-157-167 Оригинальная статья/Research article
УДК 661.715.7:66.011 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Оптимизация содержания пропилена в пропан-пропиленовой фракции, подаваемой на алкилирование бензола с целью получения изопропилбензола

Сергей В. Лошманов [1] chemicaluniversity@mail.ru .
Сергей В. Попов [1] svpopov2018@ya.ru 0000-0003-0533-9049
Оксана В. Хабибрахманова [1] chemicaluniversity@mail.ru 0000-0002-1523-9861

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

Аннотация. Одним из ответственных узлов для установок получения изопропилбензола является узел подготовки фракций реактантов, в частности используемой пропан-пропиленовой фракции. В соответствии с Техническими условиями ТУ 0272-024-00151638-99 содержание пропилена в этой фракции должно составлять не менее 65%мас. Такое достаточно низкое содержание пропилена для проведения реакции алкилирования бензола приводит к неэффективному использованию реакционного объёма реактора алкилирования. Рассматривается работа узла концентрирования пропилена из пропан-пропиленовой фракции промышленного производства изопропилбензола алкилированием бензола пропиленом. Исследование проводится с использованием моделирующей системы Honeywell UniSim Design. Моделируется протекание процесса в одной ректификационной колонне и при использовании двух колонн. Проведением вычислительного эксперимента показано, что для получения пропиленовой (расчетное содержание пропилена 99,1%мас.) и пропановой (расчетное содержание пропана 90%мас. пропилена – 4,47%мас.) фракций, удовлетворяющих параметрам действующих нормативных документов, возможно использование одной ректификационной колонны с технологическими режимами: Тниз=31,4 °С, Тверх=21,17 °С, давление в аппарате 1050кПа, флегмовое число R=13,43. При использовании двух колонн первая качественно «формирует» пропиленовую фракцию (расчетное содержание пропилена 99,1%мас., пропана 0.8%мас), а вторая колонна – пропановую фракцию с практическим отсутствием в ней пропилена (содержание пропана 94,42%мас., пропилена - 0.03%мас.). Разработанные модели технологических схем концентрирования пропилена из пропан-пропиленовой фракции могут использоваться для оценки режимных и конструкционных параметров колонн и анализа достигаемых показателей процесса. Расчетами показано, что на промышленном узле вероятной причиной высокого содержания пропана в получаемой пропиленовой фракции порядка 7%мас. является поддержание неоптимальных технологических режимов. Приводятся значения целесообразных режимных параметров.

Ключевые слова: бензол, пропилен, пропан-пропиленовая фракция, алкилирование, изопропилбензол, моделирование.

Optimization of the propylene content in the propane-propylene fraction fed to benzene alkylation in order to obtain isopropylbenzene

Sergey V. Loshmanov [1] chemicaluniversity@mail.ru .
Sergey V. Popov [1] svpopov2018@ya.ru 0000-0003-0533-9049
Oksana V. Khabibrakhmanova [1] chemicaluniversity@mail.ru 0000-0002-1523-9861

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

Abstract. One of the critical units for isopropylbenzene production plants is the unit for preparation of reactant fractions, in particular, the used propane-propylene fraction. In accordance with the Specifications TU 0272-024-00151638-99, the content of propylene in this fraction must be at least 65% wt. Such a sufficiently low content of propylene to carry out the reaction of benzene alkylation leads to inefficient use of the reaction volume of the alkylation reactor. The operation of the unit for the concentration of propylene from the propane-propylene fraction of the industrial production of isopropylbenzene by alkylation of benzene with propylene is considered. The study is carried out using the Honeywell UniSim Design modeling system. The flow of the process in one distillation column and when using two columns is simulated. A computational experiment has shown that in order to obtain propylene (calculated propylene content 99.1% wt.) and propane (estimated propane content 90% wt. propylene - 4.47% wt.) fractions that meet the parameters of current regulatory documents, it is possible to use one distillation column with technological modes: Tlow=31.4 °C, Tup=21.17 °C, apparatus pressure 1050kPa, reflux ratio R=13.43. When using two columns, the first one qualitatively "forms" the propylene fraction (calculated content of propylene 99.1% wt., propane 0.8% wt.), and the second column - the propane fraction with the practical absence of propylene in it (propane content 94.42% wt., propylene - 0.03% wt.). The developed models of technological schemes for the concentration of propylene from the propane-propylene fraction can be used to evaluate the operating and design parameters of columns and analyze the achieved process indicators. Calculations show that at the industrial site, the probable cause of the high propane content in the resulting propylene fraction is about 7% wt. is the maintenance of non-optimal technological regimes. Values of expedient operating parameters are given.

Keywords: benzene, propylene, propane-propylene fraction, alkylation, isopropylbenzene, modeling

Для цитирования
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:10.20914/2310-1202-2022-4-157-167

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

© 2022, Лошманов С.В. и др. / Loshmanov S.V. at al

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

Введение

Производство изопропилбензола является первой стадией совместного получения фенола и ацетона кумольным методом [1]. Ежегодный прирост синтеза фенола составляет величину порядка 6% [2], что объясняет научный и практический интерес к совершенствованию процесса алкилирования бензола пропиленом, направления исследования которого затрагивают кинетику и технологическое оформление процесса, его аппаратурное оформление, системы автоматического регулирования и другое [3–14]. В частности, возможность использования вихревого смесителя для смешения осушенной бензольной шихты и полиалкилбензолов с пропиленом показана в [5], в патенте [6] предлагается раздельное проведение реакции алкилирования и переалкилирования. В патенте [7] для увеличения выхода и оптимизации фракционного состава используют реакционно-ректификационную колонну. Разработка катализаторов для процесса алкилирования бензола пропиленом описывается в исследованиях [8–10].

Одним из ответственных узлов для установок получения изопропилбензола является узел подготовки фракций реактантов, в частности используемой пропан-пропиленовой фракции (ППФ). В соответствии с Техническими условиями ТУ 0272–024–00151638–99 [11] содержание пропилена в ППФ должно составлять не менее 65% мас. В одном из ранних исследований [12] описывается способ разделения пропана и пропилена, в котором используется ректификационная колонна с 200 тарелками, работающая при давлении 1,8 МПа. В ректификационном способе концентрирования пропилена выше 97% мас. используют углеводородные разбавители [13]. В патенте [14] для разделения газов пиролиза предлагается выделять пропилен из ППФ в двух ректификационных колоннах, обеспечивающих содержание олефина в пропиленовой фракции 90% мас.

Цель работы – оптимизация содержания пропилена до 99,1% мас. в пропиленовой фракции, выделенной из ППФ для промышленной установки получения изопропилбензола.

Методы

Анализы состава ППФ на действующем производстве показывают, что содержание пропилена в ППФ может изменяться от 52,8 до 65,1% мас. [15]. Такое достаточно низкое содержание пропилена для проведения реакции алкилирования бензола приводит к неэффективному использованию реакционного объёма, так как пропан в рассматриваемом случае не участвует в реакции и является «балластом», занимающим соответствующий объём реактора.

Исследования по концентрированию пропилена из ППФ проводили с использованием программной среды Honeywell UniSim Design [16]. Для расчета термодинамических свойств компонентов технологических потоков использовали метод NRTL. В состав компонентов технологических потоков входили метан, этан, пропан, изобутан, 1-бутен и пропилен.

На рисунке 1 в координатах «давление-температура» показаны кривые кипения и конденсации для рассматриваемой ППФ. Видно, что их близкое расположение объясняет наличие определенных трудностей для разделения компонентов смеси.

Результаты и обсуждение

Для оценки технологических режимов и конструкционных параметров массообменного аппарата для концентрирования пропилена было рассчитано теоретически оптимальное аппаратурное оформление колонны. Расчеты показали, что при использовании ректификационной колонны с давлением в аппарате порядка 1050 кПа для снижения содержания пропана в дистилляте (пропиленовая фракция) до 0,008 мол. доля и содержания пропилена в кубе (пропановая фракция) 0,005 мол. доля потребуется 54 теоретических тарелок (актуальное число тарелок 71 и тарелка питания 29), принятое флегмовое число R = 15, температуры в конденсаторе и ребойлере 19,26 и 30,28 °С соответственно.

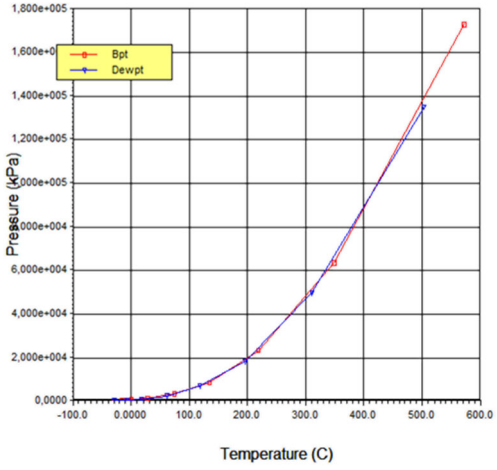


Рисунок 1. Кривые кипения и конденсации смеси компонентов ППФ (распечатка в Honeywell UniSim Design)

Figure 1. Curves of boiling and condensation of a mixture of PPF components (printout in Honeywell UniSim Design)

Для дальнейшего рассмотрения возможности концентрирования пропилена в пропиленовой фракции рассматривали два варианта технологического оформления процесса – с использованием одной ректификационной колонны и системы, состоящей из двух колонн. При этом

были взяты следующие конструкционные параметры: число тарелок Nт = 71, тарелка питания Nпит = 29, эффективность контактного устройства 0,8 (предполагается использование клапанных тарелок, в частности клапанных эжекционных ЭТ-ИМПА-01 ТУ 3611–004–507890004–2006).

На рисунке 2 показан вариант с использованием одной ректификационной колонны. Пропан-пропиленовая фракция (поток **ппф-2**) после рекуперативного теплообменника ТОА2–2–2 и теплообменника ТОА1–2–2 поступает на 29 тарелку ректификационной колонны К-14/2 изм-2. В качестве дистиллята отбирается пропиленовая фракция (поток **фрПРОПИЛЕН-2**), кубовый продукт поступает после насоса Н-19–2–2 в теплообменник ТОА2–2–2, где отдает тепло сырьевому потоку **ппф-2**. Охлажденная пропановая фракция – поток **фр_ПРОПАН-2**. Значения технологических режимов и компонентный состав потоков колонны К-14/2 изм-2 показаны в таблице 1 (оценка флегмового числа R = 13,43), температурный профиль по высоте колонны приведен на рисунке 3.

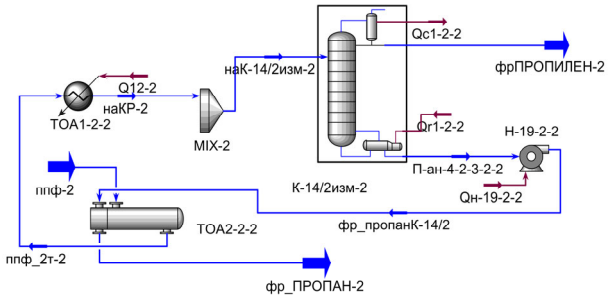


Рисунок 2. Одноколонная система концентрирования пропилена из ППФ (распечатка в Honeywell UniSim Design)

Figure 2. PPF Single Column Propylene Concentration System (printout from Honeywell UniSim Design)

Таблица 1.

Значения технологических режимов (a) и компонентный состав потоков (b) колонны К-14/2 изм-2 (распечатка в Honeywell UniSim Design)

Table 1.

Values of technological regimes (a) and component composition of flows (b) of column K-14/2 изм-2 (printout in Honeywell UniSim Design)

Name	наК-14/2изм-	П-ан-4-2-3-2-	фрПРОПИЛЕ
Vapour	0,0000	0,0000	0,0000
Temperature [C]	25,00	31,40	21,17
Pressure [kPa]	1130	1090	1050
Molar Flow [kgmole/h]	140,0	40,72	99,28
Mass Flow [kg/h]	6000	1823	4177
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	11,59	3,568	8,023
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-3,097e+004	-1,149e+005	3361
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	121,4	169,1	94,62
Heat Flow [kJ/h]	-4,336e+006	-4,679e+006	3,336e+005

(a)

	наК-14/2изм-2	П-ан-4-2-3-2-2	фрПРОПИЛЕН-2
Methane	0,000400	0,000000	0,000564
Ethane	0,000500	0,000000	0,000705
Propane	0,267534	0,900264	0,008000
i-Butane	0,014707	0,050563	0,000000
1-Butene	0,001301	0,004472	0,000000
Propene	0,715558	0,044702	0,990730

(b)

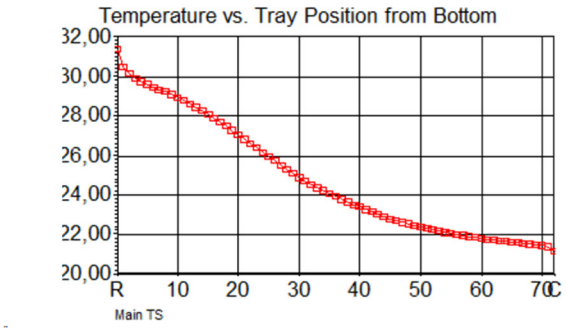


Рисунок 3. Температурный профиль по высоте колонны (распечатка в Honeywell UniSim Design)

Figure 3. Temperature profile along the height of the column (printout in Honeywell UniSim Design)

Из таблицы 1 видно, что при рассчитанных технологических режимах (Тниз = 31,40 °С, Тверх = 21,17 °С, Рниз = 1090кПа, Рверх = 1050кПа, R = 13,43) содержание пропилена в пропиленовой фракции (поток **фрПРОПИЛЕН-2**) составляет 99,07% мас., что значительно лучше показателей, изложенных в стандарте СТ 300101–2014 [17], где отмечено, что содержание олефина должно быть не менее 92% мас. Пропан в пропановой фракции (поток **фр_ПРОПАН-2**) содержится в количестве 90% мас. (содержание пропилена 4,47% мас.), данные показатели соответствуют Техническим условиям ТУ 0272–023–00151638–99 [18].

На узле концентрирования пропилена из ППФ используются колонны с 71 клапанными 2-х поточными тарелками, диаметр и высота аппаратов – 2 м и 36,7 м соответственно [19]. В таблице 2 приведены рассчитанные конструкционные параметры колонны К-14/2 изм-2, полученные для расхода питания колонны 6 т/ч. Видно, что возможно использование колонны с одинаковым диаметром в её исчерпывающей и укрепляющей частях. Сравнение соответствующих характеристик промышленной и рассчитанной колонн указывает на их близкие численные значения. Следовательно, для рассматриваемой ректификационной колонны (диаметр 2 м) величина 6 т/ч является номинальным расходом питания, при котором обеспечивается устойчивая работа тарелок. При возрастании нагрузки на колонну требуется соответствующее увеличение её диаметра, в частности при нагрузке 8 т/ч целесообразный диаметр составляет величину 2,3 м, а при нагрузке 10 т/ ч – 2,5 м.

При эксплуатации колонн необходимо учитывать интервал допустимых нагрузок, при которых тот или иной тип тарелок работает в устойчивом режиме, то есть не возникает режим «захлёбывания» или «провала». Отметим, что предложенная технологическая схема с соответствующими режимными параметрами колонны (рисунок 2) может быть использована для подготовки пропиленовой фракции промышленной установки алкилирования бензола.

Вместе с тем присутствие пропилена (4,47% мас.) в пропановой фракции приводит к его «потере» для реакции алкилирования. Для решения данного вопроса ниже проводится моделирование и оптимизация режимов работы аппаратов промышленного узла концентрирования пропилена из ППФ [19].

На рисунке 4 показана разработанная модель технологической схемы узла концентрирования пропилена.

Таблица 2.
Конструкционные параметры колонны К-14/2 изм-2 (распечатка в Honeywell UniSim Design)

Table 2.
Structural parameters of the K-14/2 изм-2 column (printout in Honeywell UniSim Design)

Tray Results

Section	Section_1	Section_2
Internals	Valve	Valve
Section Diameter [m]	1,981	1,981
Max Flooding [%]	84,26	84,81
X-Sectional Area [m2]	3,083	3,083
Section Height [m]	25,60	15,95
Section DeltaP [kPa]	29,15	18,55
Number of Flow Paths	2	2
Flow Length [mm]	673,1	673,1
Flow Width [mm]	1721	1721
Max DC Backup [%]	42,22	46,50
Max Weir Load [m3/h-m]	45,42	47,96
Max DP/Tray [kPa]	0,696	0,642
Tray Spacing [mm]	609,6	550,0

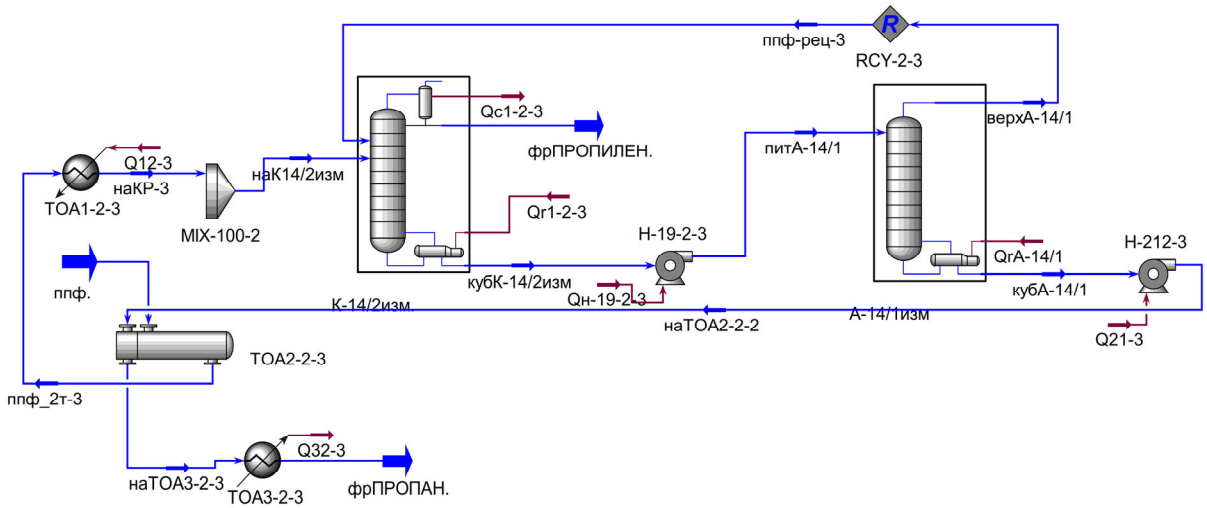


Рисунок 4. Модель промышленного узла концентрирования пропилена из ППФ (распечатка в Honeywell UniSim Design)

Figure 4. Model of an industrial plant for the concentration of propylene from PPF (printout in Honeywell UniSim Design)

Поток **ппф** после системы теплообменников, аналогичной соответствующим теплообменникам схемы на рисунке 2, поступает на 29 тарелку ректификационной колонны К-14/2 изм. Дистиллят колонны – пропиленовая фракция (поток **фрПРОПИЛЕН**). Отличительной особенностью от предыдущей технологической схемы является использование второй колонны А-14/1 изм, на питание которой в её верхнюю часть подается кубовый продукт колонны К-14/2 изм. С верха колонны А-14/1 изм после компрессора К-100 технологический поток **ппф-рец-3** рециркулирует в нижнюю часть колонны К-14/2 изм. Кубовый продукт колонны А-14/1 изм – пропановая

фракция, после охлаждения в системе теплообменников – поток **фр_ПРОПАН**. Сравнение технологических схем (рисунок 2 и рисунок 4) показывает, что назначение второй колонны – практическое выведение пропилена из состава пропановой фракции. При этом при использовании одноколонной системы концентрирования пропилена из ППФ величина флегмового числа (R = 13.43) выбиралась из необходимости удовлетворения требованиям нормативов [17, 18]. При использовании двух колонн первая качественно «формирует» пропиленовую фракцию (содержание пропана 0.8% мас), а вторая колонна – пропановую фракцию с практическим отсутствием в ней пропилена (0.03% мас.).

Значения рассчитанных технологических параметров и компонентный состав потоков ректификационных колонн К-14/2 изм (флегмовое число R = 15) и А-14/1 изм приведены в таблице 3 и таблице 4 соответственно. Изменение температуры по высоте колонн показано на рисунке 5. Для колонн с диаметром 2 м величина расхода питания должна быть порядка 6 т/ч. Отметим, что приведенные технологические режимы могут быть использованы в промышленных условиях.

Таблица 3.

Значения технологических параметров (a) и компонентный состав потоков (b) колонны К-14/2 изм (распечатка в Honeywell UniSim Design)

Table 3.

Values of technological parameters (a) and component composition of flows (b) of column K-14/2 изм (printout in Honeywell UniSim Design)

Name	ппф-рец-3	наК14/2изм	кубК-14/2изм	фрПРОПИЛЕ
Vapour	0,9998	0,0000	0,0000	0,0000
Temperature [C]	30,15	42,00	29,71	21,17
Pressure [kPa]	1100	1667	1090	1050
Molar Flow [kgmole/h]	456,8	140,0	495,8	101,0
Mass Flow [kg/h]	2,006e+004	6000	2,181e+004	4250
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	39,47	11,59	42,90	8,163
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-9,028e+004	-2,896e+004	-1,072e+005	3363
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	177,0	134,0	164,8	94,62
Heat Flow [kJ/h]	-4,124e+007	-4,054e+006	-5,317e+007	3,397e+005

(a)

	ппф-рец-3	наК14/2изм	кубК-14/2изм	фрПРОПИЛЕН.
Methane	0,000000	0,000400	0,000000	0,000555
Ethane	0,000000	0,000500	0,000000	0,000693
Propane	0,890546	0,267534	0,894441	0,008000
i-Butane	0,002392	0,014707	0,006357	0,000000
1-Butene	0,000168	0,001301	0,000522	0,000000
Propene	0,106894	0,715558	0,098680	0,990752

(b)

Таблица 4.

Значения технологических параметров (a) и компонентный состав потоков (b) колонны А-14/1 изм (распечатка в Honeywell UniSim Design)

Table 4.

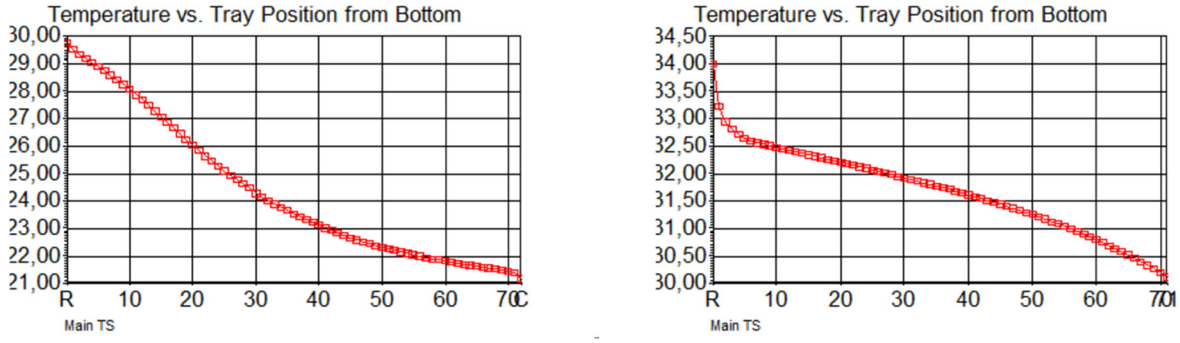
Values of technological parameters (a) and component composition of streams (b) of column A-14/1 изм (printout in Honeywell UniSim Design)

Name	питА-14/1	кубА-14/1	верхА-14/1
Vapour	0,0000	0,0000	0,9998
Temperature [C]	29,92	34,00	30,15
Pressure [kPa]	1300	1150	1100
Molar Flow [kgmole/h]	495,8	41,07	454,7
Mass Flow [kg/h]	2,181e+004	1843	1,997e+004
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	42,90	3,610	39,29
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-1,072e+005	-1,201e+005	-9,019e+004
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	166,4	172,7	177,0
Heat Flow [kJ/h]	-5,316e+007	-4,934e+006	-4,101e+007

(a)

	питА-14/1	кубА-14/1	верхА-14/1
Methane	0,000000	0,000000	0,000000
Ethane	0,000000	0,000000	0,000000
Propane	0,894441	0,944283	0,889939
i-Butane	0,006357	0,050896	0,002334
1-Butene	0,000522	0,004476	0,000164
Propene	0,098680	0,000345	0,107562

(b)



(a) (b)

Рисунок 5. Температурный профиль по высоте колонн К-14/2 изм (a) и А-14/1 изм (b) (распечатка в Honeywell UniSim Design)

Figure 5. Temperature profile along the height of columns К-14/2 изм (a) and А-14/1 изм (b) (printout in Honeywell UniSim Design)

Разработанная модель двухколонной технологической схемы была использована для анализа работы промышленного узла концентрирования пропилена [19]. Расчетами показано, что вероятной причиной высокого содержания пропана (порядка 7% мас.) в получаемой пропиленовой фракции является использование неоптимальных технологических режимов.

Для получения в промышленных условиях на существующих колонных аппаратах диаметром 2 м (с сохранением используемых давлений в аппаратах порядка 1600кПа) пропиленовой фракции с содержанием пропилена 99,1% мас. целесообразно увеличение флегмового числа с R = 9,8 до R = 15 с одновременным уменьшением расхода питания до 6 т/ч и поддержанием следующих температурных режимов колонн: для колонны К-14/2 температура в конденсаторе Тконд = 35,87 °С и температура в ребойлере Треб = 45,66 °С, для колонны К-14/1 температура верха Тверх = 45,77 °С и температура в ребойлере Треб = 49,76 °С. Приведенные режимы значительно отличаются от используемых в промышленности.

Заключение

Анализ состава промышленной ППФ, используемой при алкилировании бензола с целью получения изопропилбензола, показал, что для эффективного использования реакционного объёма реактора алкилирования необходимо концентрирование пропилена из ППФ. На действующем узле получаемая пропиленовая фракция содержит 6,18÷8,94% мас. пропана.

С целью оценки возможности существенного концентрирования пропилена из ППФ до 99,1% мас. в программной среде Honeywell UniSim Design были разработаны модели технологических схем концентрирования. Проведением вычислительного эксперимента показано, что для получения из ППФ пропиленовой и пропановой фракций, удовлетворяющих параметрам из нормативных документов [17, 18], возможно использование одной ректификационной колонны. Для схемы, состоящей из двух колонн, найдены оптимальные технологические режимы, обеспечивающие в получаемой пропиленовой фракции содержание пропилена 99,1% мас. и пропана не более 0,8% мас., остаточное содержание пропилена в пропановой фракции порядка 0,03% мас.

Разработанные модели технологических схем концентрирования пропилена из ППФ могут использоваться для оценки режимных и конструкционных параметров массообменных колонн и анализа достигаемых показателей процесса.

Литература

1 Dirin A.M., Saljoughi E., Mousavi S.M., Kiani S. Pervaporation separation of isopropylbenzene from water using four different polymeric membranes: Membrane preparation, modification, characterization, and performance evaluation // Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2020. V. 114. P. 67-80. doi: 10.1016/j.jtice.2020.09.023

2 Рынок фенола в России. Текущая ситуация и прогноз 2022–2026 гг. ACG, 2021. 115 с.

3 Гайле А.А., Сомов В.Е., Варшавский О.М. Ароматические углеводороды. Выделение, применение, рынок. М.: Химиздат, 2000. 464 с.

4 Zheng J., Yi Y., Wang W., Guo K. et al. Synthesis of bi-phases composite zeolites MFZ and its hierarchical effects in isopropylbenzene catalytic cracking // Microporous and mesoporous materials. 2013. V. 171. P. 44-52. doi: 10.1016/j.micromeso.2012.12.041

5 Пат. № 2477717, RU, C07C 15/085, 2/68. Способ получения изопропилбензола / Чернов В.А., Штатнов Д.В., Фролов В.В., Куревин В.А., Паруллин А.Г. № 2011142714/04; Заявл. 21.10.2011; Опубл. 20.03.2013, Бюл. № 8.

6 Пат. № 2639706, RU, C07C 15/085, 2/66, 6/12. Способ получения изопропилбензола / Нестерова Т.Н., Востриков С.В., Мазурин О.А. № 2016120713; Заявл. 26.05.2016; Опубл. 30.11.2017, Бюл. № 34.

7 Пат. № 115779, RU, C07C 2/66, 15/085, 6/12, B01J 37/08, 37/04, 29/70. Способ приготовления катализатора и способ получения изопропилбензола с использованием этого катализатора / Ечевский Г.В., Коденев Е.Г. № 2020116663; Заявл. 21.05.2020; Опубл. 04.12.2020, Бюл. № 34.

8 Пат. № 2097129, RU, B01J 29/70, 37/00, C07C 2/66. Катализатор для алкилирования бензола пропиленом и способ его приготовления / Романников В.Н. № 95110647/04; Заявл. 28.06.1995; Опубл. 27.11.1997.

9 Пат. № 2096086, RU, B01J 27/182, C07C 15/085. Катализатор синтеза кумола / Тарасова Д.В., Содержинова М.М., Яковлева Т.Н., Бакши Ю.М., Гельперин Е.И., Смирнов В.В., Судакова Н.Р., Локтев А.С. № 95109723/04; Заявл. 13.06.1995; Опубл. 20.11.1997.

10 Пат. № 2737897, RU, C07C 2/66, 15/085, 6/12, B01J 37/08, 37/04, 29/70. Способ приготовления катализатора и способ получения изопропилбензола с использованием этого катализатора / Ечевский Г.В., Коденев Е.Г. № 2020116663; Заявл. 21.05.2020; Опубл. 04.12.2020, Бюл. № 34.

11 Lakshmanan V.M., Kallingal A., Sreekumar S. Robust control of isopropyl benzene production process using H∞ loop shaping control scheme // Journal of Control and Decision. 2022. P. 1-11. doi: 10.1080/23307706.2022.2146009

12 Zhu W., Li E., Huang F. Highly selective separation of isopropylbenzene and α-methylstyrene by nonporous adaptive crystals of perbromoethylated pillararene via vapor-and liquid-phase adsorptions // ACS Applied Materials & Interfaces. 2021. V. 13. №. 6. P. 7370-7376. doi: 10.1021/acsami.0c23059

13 Пат. № 2296736, RU, C07C 7/05, 11/06, 9/08. Способ разделения пропена и пропана / Павлов О.С., Павлов Д.С., Павлов С.Ю. № 2006104239/04; Заявл. 13.02.2006; Опубл. 10.04.2007, Бюл. № 10.

14 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.

15 Chudinova A.A. Buchatskaya N.I., Podgorniy V.V., Gavrikov A.A. et al. Increase of efficiency isopropylbenzene manufacturing with use of integrated mathematical models // Petroleum & Coal. 2016. V. 58. №. 2.

16 Machado S.W.M., Santana J.C., Pedrosa A.M., Souza M.J. et al. Catalytic cracking of isopropylbenzene over hybrid HZSM-12/M41S (M41S= MCM-41 or MCM-48) micro-mesoporous materials // Petroleum Science and Technology. 2018. V. 36. №. 13. P. 923-929. doi: 10.1080/10916466.2018.1454950

17 Ai X., Li X., Yu Y., Pan H. et al. The mechanical, thermal, rheological and morphological properties of PLA/PBAT blown films by using bis (tert-butyl dioxy isopropyl) benzene as crosslinking agent // Polymer Engineering & Science. 2019. V. 59. №. S1. P. E227-E236. doi: 10.1002/pen.24927

18 Jiménez-García G., de Lasa H., Maya-Yescas R. Simultaneous estimation of kinetics and catalysts activity during cracking of 1, 3, 5-tri-isopropyl benzene on FCC catalyst // Catalysis Today. 2014. V. 220. P. 178-185. doi: 10.1016/j.cattod.2013.10.026

19 Zeynalov E.B., Nagiyev Y.M., Magerramova M.Y. Investigation of catalytic properties of nano-particulated titanium dioxide in oxidation of isopropylbenzene // Azerbaijan Chemical Journal. 2016. №. 1. P. 97-101.

20 Vovdenko M.K., Gabitov S.A., Koledina K.F., Ahmerov E.A. et al. Mathematical modeling of isopropylbenzene oxidation reaction and oxidation reactor // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2018. V. 1096. №. 1. P. 012189. doi: 10.1088/1742-6596/1096/1/012189

References

1 Dirin A.M., Saljoughi E., Mousavi S.M., Kiani S. Pervaporation separation of isopropylbenzene from water using four different polymeric membranes: Membrane preparation, modification, characterization, and performance evaluation. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2020. vol. 114. pp. 67-80. doi: 10.1016/j.jtice.2020.09.023

2 Phenol market in Russia. Current situation and forecast 2022–2026 ACG, 2021. 115 p. (in Russian).

3 Gaile A.A., Somov V.E., Varshavsky O.M. aromatic hydrocarbons. Isolation, application, market. Moscow, Himizdat, 2000. 464 p. (in Russian).

4 Zheng J., Yi Y., Wang W., Guo K. et al. Synthesis of bi-phases composite zeolites MFZ and its hierarchical effects in isopropylbenzene catalytic cracking. Microporous and mesoporous materials. 2013. vol. 171. pp. 44-52. doi: 10.1016/j.micromeso.2012.12.041

5 Chernov V.A., Shtatnov D.V., Frolov V.V., Kurevin V.A., Parullin A.G. Method for obtaining isopropylbenzene. Patent RF, no. 2477717, 2013.

6 Nesterova T.N., Vostrikov S.V., Mazurin O.A. Method for obtaining isopropylbenzene. Patent RF, no. 2639706, 2017.

7 Echevsky G.V., Kodenev E.G. A method for preparing a catalyst and a method for producing isopropylbenzene using this catalyst. Patent RF, no. 115779, 2020.

8 Romannikov V.N. Catalyst for alkylation of benzene with propylene and method of its preparation. Patent RF, no. 2097129, 1997.

9 Tarasova D.V., Soderzhinova M.M., Yakovleva T.N., Bakshi Yu.M., Gelperin E.I., Smirnov V.V., Sudakova N.R., Loktev A.S. Cumene synthesis catalyst. Patent RF, no. 2096086, 1997.

10 Echevsky G.V., Kodenev E.G. A method for preparing a catalyst and a method for producing isopropylbenzene using this catalyst. Patent RF, no. 2737897, 2020.

11 Lakshmanan V.M., Kallingal A., Sreekumar S. Robust control of isopropyl benzene production process using H∞ loop shaping control scheme. Journal of Control and Decision. 2022. pp. 1-11. doi: 10.1080/23307706.2022.2146009

12 Zhu W., Li E., Huang F. Highly selective separation of isopropylbenzene and α-methylstyrene by nonporous adaptive crystals of perbromoethylated pillararene via vapor-and liquid-phase adsorptions. ACS Applied Materials & Interfaces. 2021. vol. 13. no. 6. pp. 7370-7376. doi: 10.1021/acsami.0c23059

13 Pavlov O.S., Pavlov D.S., Pavlov S.Yu. Method for the separation of propene and propane. Patent RF, no. 2296736, 2007.

14 Belov E.A., Belov A.A., Zaripov R.T., Minigulov F.G., Safin D.Kh. Method for separating propylene from propane-propylene fraction. Patent RF, no. 2733380, 2020.

15 Chudinova A.A. Buchatskaya N.I., Podgorniy V.V., Gavrikov A.A. et al. Increase of efficiency isopropylbenzene manufacturing with use of integrated mathematical models. Petroleum & Coal. 2016. vol. 58. no. 2.

16 Machado S.W.M., Santana J.C., Pedrosa A.M., Souza M.J. et al. Catalytic cracking of isopropylbenzene over hybrid HZSM-12/M41S (M41S= MCM-41 or MCM-48) micro-mesoporous materials. Petroleum Science and Technology. 2018. vol. 36. no. 13. pp. 923-929. doi: 10.1080/10916466.2018.1454950

17 Ai X., Li X., Yu Y., Pan H. et al. The mechanical, thermal, rheological and morphological properties of PLA/PBAT blown films by using bis (tert-butyl dioxy isopropyl) benzene as crosslinking agent. Polymer Engineering & Science. 2019. vol. 59. no. S1. pp. E227-E236. doi: 10.1002/pen.24927

18 Jiménez-García G., de Lasa H., Maya-Yescas R. Simultaneous estimation of kinetics and catalysts activity during cracking of 1, 3, 5-tri-isopropyl benzene on FCC catalyst. Catalysis Today. 2014. vol. 220. pp. 178-185. doi: 10.1016/j.cattod.2013.10.026

19 Zeynalov E.B., Nagiyev Y.M., Magerramova M.Y. Investigation of catalytic properties of nano-particulated titanium dioxide in oxidation of isopropylbenzene. Azerbaijan Chemical Journal. 2016. no. 1. pp. 97-101.

20 Vovdenko M.K., Gabitov S.A., Koledina K.F., Ahmerov E.A. et al. Mathematical modeling of isopropylbenzene oxidation reaction and oxidation reactor. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2018. vol. 1096. no. 1. pp. 012189. doi: 10.1088/1742-6596/1096/1/012189

Сведения об авторах

Сергей В. Лошманов магистрант, кафедра химии и химической технологии, Самарский государственный технический университет, филиал в г. Новокуйбышевске, ул. Миронова, 5, г. Новокуйбышевск, 446200, Россия, chemicaluniversity@mail.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, svpopov2018@ya.ru
https://orcid.org/0000-0003-0533-9049

Оксана В. Хабибрахманова к.х.н., доцент, кафедра химии и химической технологии, Самарский государственный технический университет, филиал в г. Новокуйбышевске, ул. Миронова, 5, г. Новокуйбышевск, 446200, Россия, chemicaluniversity@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-1523-9861

Information about authors

Sergey V. Loshmanov master student, chemistry and chemical technology department, Samara State Technical University, branch in Novokuibyshevsk, st. Mironova, 5, Novokuibyshevsk, 446200, Russia, chemicaluniversity@mail.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

Oksana V. Khabibrakhmanova Cand. Sci. (Chem.), associate professor, chemistry and chemical technology department, Samara State Technical University, branch in Novokuibyshevsk, st. Mironova, 5, Novokuibyshevsk, 446200, Russia, chemicaluniversity@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-1523-9861

Вклад авторов

Сергей В. Лошманов обзор литературных источников по исследуемой проблеме, разработал модели и провел вычислительный эксперимент

Сергей В. Попов разработал модели и провел вычислительный эксперимен

Оксана В. Хабибрахманова обзор литературных источников по исследуемой проблеме

Contribution

Sergey V. Loshmanov review of the literature on an investigated problem, developed models and conducted a computational experiment

Sergey V. Popov developed models and conducted a computational experiment

Oksana V. Khabibrakhmanova review of the literature on an investigated problem

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 13/10/2022	**После редакции** 04/11/2022	**Принята в печать** 28/11/2022
Received 13/10/2022	**Accepted in revised** 04/11/2022	**Accepted** 28/11/2022