

УДК 66.048.623

ПРИМЕНЕНИЕ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ И ЭКСТРАКТИВНОЙ РЕКТИФИКАЦИИ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ СМЕСИ БУТИЛПРОПИОНАТ–ПРОПИОНОВАЯ КИСЛОТА–БУТИЛБУТИРАТ–МАСЛЯНАЯ КИСЛОТА

© 2024 г. Т. В. Челюскина*, Ф. Н. Бедретдинов, С. А. Потемин

МИРЭА – Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова), Москва, Россия

* e-mail: chelyuskina@mirea.ru

Поступила в редакцию 28.12.2023 г.

После доработки 02.02.2024 г.

Принята к публикации 07.02.2024 г.

Разработана принципиальная технологическая схема разделения на индивидуальные компоненты смеси бутилпропионат–пропионовая кислота–бутилбутират–масляная кислота, содержащая колонну фракционирования и комплексы экстрактивной ректификации биазеотропных составляющих бутилпропионат–пропионовая кислота и бутилбутират–масляная кислота с применением сульфолана в качестве разделяющего агента. Проведено исследование взаимного хода различных изомногообразий в производных разделительных системах бутилпропионат–пропионовая кислота–сульфолан и бутилбутират–масляная кислота–сульфолан и установлено, что их расположение является благоприятным для проведения процесса экстрактивной ректификации. На основе анализа диаграмм относительной летучести компонентов биазеотропных смесей в присутствии сульфолана выбрано соотношение количеств разделяющего агента и исходной смеси, необходимое для реализации разделения. Определены параметры работы колонн схемы, обеспечивающие чистоту индивидуальных компонентов не менее 0.9950 мол. д. с минимальными энергетическими затратами в кипятильниках колонн.

Ключевые слова: математическое моделирование, парожидкостное равновесие, биазеотропная составляющая, фракционирование, относительная летучесть компонентов, экстрактивная ректификация, сульфолан

DOI: 10.31857/S0040357124010155, EDN: YVNSPE

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в технологии основного органического и нефтехимического синтеза самым распространенным и наиболее энергоемким методом разделения жидких многокомпонентных смесей является ректификация. Важным является выбор наименее энергоемкого варианта разделения смеси, основанного на ректификации. В случае гомогенных зеотропных смесей с числом компонентов от трех и более, возникает поливариантность в организации последовательности выделения веществ из n-компонентной смеси. С.В. Львовым предложена формула для определения числа возможных вариантов разделения таких смесей [1]:

$$N = \frac{[2(n-1)]!}{n!(n-1)!} \quad (1)$$

Очевидно, что в зависимости от физико-химической природы разделяемой смеси, на-

пример, при наличии азеотропов различной компонентности и/или гетерогенных областей, количество вариантов разделения, по сравнению с зеотропной гомогенной смесью той же компонентности, увеличится.

При ректификации многокомпонентных смесей возможно несколько вариантов организации процесса: первое, второе и промежуточные заданные разделения [1, 2]. В результате получают фракции, которые содержат меньшее количество компонентов, по сравнению с исходной смесью, что снижает размерность задачи их дальнейшего разделения. Согласно [3], такой подход позволяет задействовать больший объем накопленной информации о закономерностях разделения получаемых, например, бинарных и трехкомпонентных составляющих [4]. Таким образом, в случае многокомпонентных смесей применение различных способов фракционирования играет важную роль при синтезе схем разделения.

В работах [5, 6] проведено исследование промежуточного заданного разделения при ректификации неидеальных четырехкомпонентных смесей (без рассмотрения биазеотропии в том или ином виде) на примере ряда промышленных объектов. В указанных работах отмечены как преимущества, так и недостатки реализации промежуточного заданного разделения при сравнении различных вариантов организации процесса ректификации по критерию суммарных энергетических затрат в кипятильнике колонн.

На сегодняшний день известен ряд бинарных биазеотропных смесей, имеющих промышленное значение. Такие смеси, в частности, встречаются в производстве высших жирных спиртов гидрированием синтетических жирных кислот и их эфиров [7]. На одном из этапов данного производства, а именно: на стадии этерификации, в силу обратимости реакции, не удается получить чистые эфиры без примесей карбоновых кислот. Поэтому сырые эфиры нейтрализуют раствором щелочи для удаления непрореагировавших органических кислот, а получившийся в результате нейтрализации щелочной раствор обрабатывают серной кислотой, благодаря чему регенерируются свободные кислоты, которые после промывки водой и очистки возвращаются в производство. Оставшиеся эфиры также промывают водой. В итоге после полного цикла промывок реакционной массы образуется большое количество сточных вод [7]. Данный способ получения высших жирных спиртов был [8] и остается распространенным и на сегодняшний день [9–12].

Целью данной работы является разработка и расчет принципиальной технологической схемы разделения (ПТСР) на индивидуальные компоненты смеси бутилпропионат (БП)—пропионовая кислота (ПК)—бутилбутират (ББ)—масляная кислота (МК) с применением фракционирования и экстрактивной ректификации (ЭР).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве метода исследования в данной работе выступает вычислительный эксперимент, включающий математическое моделирование фазового равновесия жидкость—пар и расчет принципиальной технологической схемы разделения, с использованием программного комплекса Aspen Plus® v. 10.0. Отклонения от идеального поведения жидкой фазы учтены с помощью уравнения Non-Random Two Liquid (NRTL) [13], рекомендованного для биазеотропных систем [14, 15], которое в программном комплексе Aspen Plus® имеет вид:

$$\ln \gamma_i = \frac{\sum_j x_j \tau_{ji} G_{ji}}{\sum_k x_k G_{ki}} + \sum_j \frac{x_j G_{ij}}{\sum_k x_k G_{kj}} \left(\tau_{ij} - \frac{\sum_m x_m \tau_{mj} G_{mj}}{\sum_k x_k G_{kj}} \right), \quad (2)$$

где $G_{ij} = \exp(-\alpha_{ij} \tau_{ij})$; $\tau_{ij} = a_{ij} + b_{ij}/T + e_{ij} \ln T + f_{ij} T$; $\alpha_{ij} = c_{ij} + d_{ij} (T - 273.15 \text{ K})$; $\tau_{ii} = 0$; $G_{ii} = 1$; a_{ij} , b_{ij} , c_{ij} , d_{ij} , e_{ij} , f_{ij} — коэффициенты бинарного взаимодействия действия уравнения NRTL. Отклонения от идеального поведения паровой фазы учтены с помощью уравнения Hayden—O’Connell (НОС) [16].

Расчет различных режимов работы колонн ПТСР реализован с помощью модуля Sensitivity Analysis программного комплекса Aspen Plus®. Для ректификационных колонн варьировали общее число тарелок в колонне N (использовали теоретические тарелки (т. т.)), положение тарелки подачи питания N_F и флегмовое число R . Для колонн экстрактивной ректификации, помимо перечисленных параметров, также варьировали положение тарелки подачи разделяющего агента N_{PA} . Нумерация тарелок ведется с верха колонны. Процесс разделения был ориентирован на содержание примесей в продуктовых потоках не более 0.0050 мол. д. и минимальные энергетические затраты в кипятильниках колонн $Q_{\text{реб}}$ при закрепленной высоте колонны. По указанным критериям проведено сравнение режимов работы колонн с одинаковым качеством продуктовых потоков для каждого набора рабочих параметров колонн.

РАСЧЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Впервые на возможность применения фракционирования при давлении 300 мм рт. ст. для разделения смеси БП—ПК—ББ—МК, содержащей биазеотропные бинарные составляющие и имеющей концентрационный симплекс, включающий 4 области дистилляции (рис. 1) [17], указали авторы [18].

Нужно отметить, что взаимное расположение сепаратрических поверхностей в концентрационном симплексе позволяет реализовать промежуточное заданное разделение исходной смеси эквимольного состава на фракции, представляющие собой биазеотропные составляющие бутилпропионат—пропионовая кислота (в дистилляте колонны) и бутилбутират—масляная кислота (в кубовом потоке колонны). Дальнейшее разделение названных фракций обычной ректификацией, в виду термодинамических ограничений,

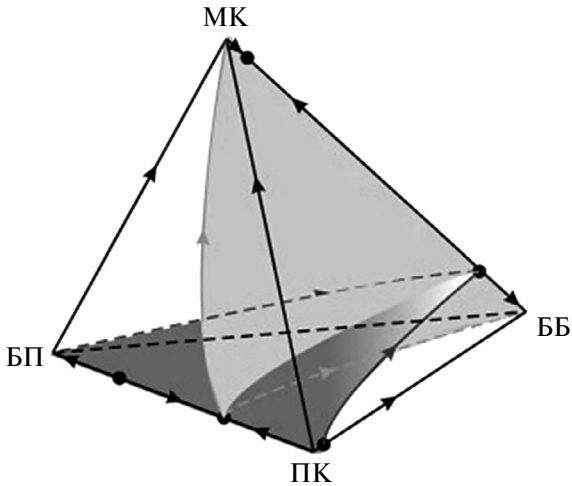


Рис. 1. Концентрационный симплекс системы бутилпропионат–пропионовая кислота–бутилбутират–масляная кислота с разделяющими поверхностями [17].

исключено, поэтому необходимо использовать специальные методы разделения [1, 2, 4].

Ранее авторами [19, 20] показана возможность разделения указанных бинарных биазеотропных смесей экстрактивной ректификацией с использованием сульфолана (СФ) [21] в качестве разделяющего агента (РА). В обоих случаях в дистилляте колонны экстрактивной ректификации наблюдалось выделение эфира (бутилпропионата или бутилбутирата), а в дистилляте колонны регенерации разделяющего агента – кислоты (пропионовой или масляной). Таким образом, сульфолан зарекомендовал себя как селективный разделяющий агент для реализации процесса экстрактивной ректификации биазеотропных смесей БП–ПК и ББ–МК.

Для математического моделирования фазового равновесия жидкость–пар и расчета ПТСР смеси бутилпропионат–пропионовая кислота–бутилбутират–масляная кислота с применением фракционирования и экстрактивной ректификации необходим набор параметров бинарного взаимодействия модели NRTL-НОС для всех бинарных составляющих базовой четырехкомпонентной смеси и производных систем, образованных разделяемыми компонентами и сульфоланом. Для смеси БП–ПК–ББ–МК набор параметров приведен в работе [17]. В связи с тем, что экспериментальные данные о фазовом равновесии в бинарных составляющих БП–СФ, ПК–СФ, ББ–СФ и МК–СФ отсутствуют, ранее нами в программном комплексе Aspen Plus v. 8.0, согласно [15, 22], получены данные о ПЖР в этих системах по модели UNIFAC-НОС и проведена собственная оценка параметров модели NRTL-НОС (табл. 1). Применение указанной модели группового взаимодействия для прогнозирования

фазового равновесия в некоторых системах, содержащих сульфолан, убедительно продемонстрировано в [23].

Таблица 1. Параметры бинарного взаимодействия модели NRTL-НОС

Компонент i	БП	ПК	ББ	МК
Компонент j	СФ	СФ	СФ	СФ
a_{ij}	40.9496	-2.0183	16.6823	2.26649
a_{ji}	-19.6218	3.68511	-9.0829	4.05547
b_{ij}	-2037.95	363.386	-678.638	123.986
b_{ji}	1151.59	-374.899	695.624	-396.896
c_{ij}	0.3	0.3	0.3	0.3
e_{ij}	-5.90304	0.295492	-2.41817	-0.339851
e_{ji}	2.98068	-0.51482	1.46223	-0.515545

Таким образом, проведенные исследования [17–20] являются основой разработанной нами принципиальной технологической схемы разделения на индивидуальные компоненты смеси бутилпропионат–пропионовая кислота–бутилбутират–масляная кислота (рис. 2). Колонны 1, 2 и 4 функционируют при давлении 300 мм рт. ст., колонны 3 и 5 – при давлении 100 мм рт. ст., поскольку, во избежание возможного термического разложения сульфолана [21], необходимо снижение температуры в колоннах его регенерации.

Исходная смесь БП–ПК–ББ–МК эквимолярного состава (100 кмоль/ч) при температуре $T_F = 121^\circ\text{C}$ и давлении $P_F = 300$ мм рт. ст. поступает в колонну 1, где происходит фракционирование. Соотношение компонентов БП и ПК

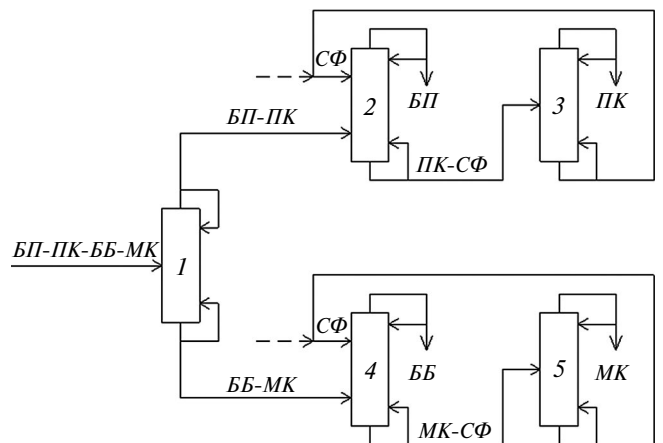


Рис. 2. Принципиальная технологическая схема разделения на индивидуальные компоненты смеси бутилпропионат–пропионовая кислота–бутилбутират–масляная кислота: 1 – колонна фракционирования, работающая в режиме промежуточного заданного разделения; 2, 4 – колонны ЭР; 3, 5 – колонны регенерации РА.

в дистилляте, а также ББ и МК в кубовом потоке составляет практически 1 : 1 для всех полученных нами режимов работы колонны. Аналогично работам [24–27] нами построена графическая зависимость энергетических затрат в кипятильнике колонны Q_{reb} от числа тарелок N в ней (рис. 3). При анализе наблюдаемой зависимости сделан вывод о наличии режима работы колонны, характеризующегося оптимальным соотношением Q_{reb} и N , которое достигается при общем числе тарелок в колонне, равном 52. Результаты расчета колонны фракционирования представлены в табл. 2.

Согласно [4, 15] начальным этапом исследования фазового поведения бинарных биазеотропных систем в присутствии разделяющего агента является анализ взаимного расположения ряда изомногообразий (единичных α -линий, псевдоидеальных линий и изотермо-изобар Банкроф-

та) в производных трехкомпонентных системах, образованных компонентами разделяемой (базовой) смеси и РА. С использованием параметров бинарного взаимодействия модели NRTL-НОС, приведенных в работе [17] и в табл. 1, нами проведено математическое моделирование фазового равновесия жидкость–пар при 300 мм рт. ст. в системах бутилпропионат–пропионовая кислота–сульфолан и бутилбутират–масляная кислота–сульфолан. По результатам моделирования в концентрационных симплексах этих систем построено взаимное расположение перечисленных выше изомногообразий (рис. 4, 5), которое соответствует всем установленным ранее закономерностям, описанным в литературе [4, 15], и указывает на то, что производные системы БП–ПК–СФ и ББ–МК–СФ являются благоприятными для проведения процесса ЭР с использованием сульфолана.

Таблица 2. Параметры работы ПТСР смеси БП–ПК–ББ–МК

№ колонны	P , мм рт. ст.	F : PA	N , т. т.	N_{PA} , т. т.	N_F , т. т.	R	x_D , мол. д.		T_D , °C	x_W , мол. д.		T_W , °C	Q_{reb} , кВт
							БП	ПК		БП	ПК		
1	300	–	52	–	41	10.6	БП	0.4986	114.40	БП	0.0014	133.20	6227.26
							ПК	0.4999		ПК	0.0001		
							ББ	0.0015		ББ	0.4985		
							МК	0.0000		МК	0.5000		
							СФ	0.0000		СФ	0.0000		
2	300	1:3	35	7	15	0.3	БП	0.9950	114.95	БП	0.0003	180.32	1091.57
							ПК	0.0019		ПК	0.1426		
							ББ	0.0031		ББ	0.0000		
							МК	0.0000		МК	0.0000		
							СФ	0.0000		СФ	0.8571		
3	100	–	15	–	7	0.9	БП	0.0021	86.33	БП	0.0000	207.17	929.93
							ПК	0.9979		ПК	0.0001		
							ББ	0.0000		ББ	0.0000		
							МК	0.0000		МК	0.0000		
							СФ	0.0000		СФ	0.9999		
4	300	1:3	50	9	19	0.4	БП	0.0029	132.77	БП	0.0000	190.46	1068.13
							ПК	0.0000		ПК	0.0000		
							ББ	0.9950		ББ	0.0003		
							МК	0.0021		МК	0.1426		
							СФ	0.0000		СФ	0.8571		
5	100	–	15	–	7	0.8	БП	0.0000	106.49	БП	0.0000	207.17	888.65
							ПК	0.0002		ПК	0.0000		
							ББ	0.0019		ББ	0.0000		
							МК	0.9979		МК	0.0001		
							СФ	0.0000		СФ	0.9999		

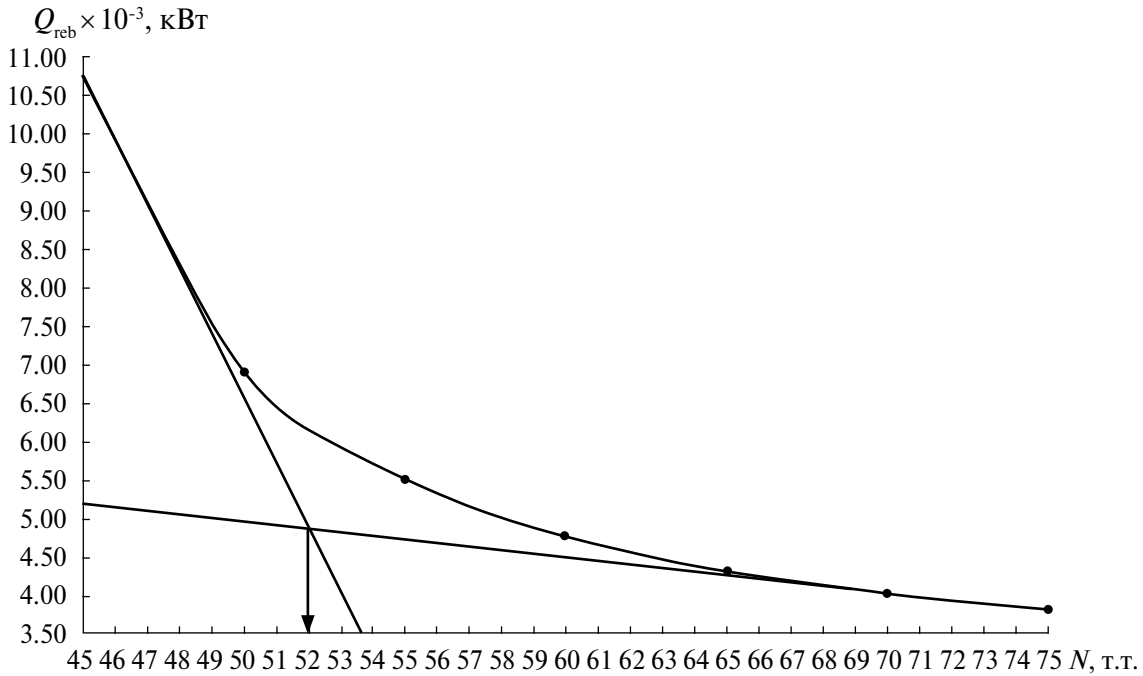


Рис. 3. Зависимость энергетических затрат в кипятильнике Q_{reb} от числа тарелок N в колонне фракционирования.

На следующем этапе исследования проведен анализ хода линий постоянных значений коэффициента относительной летучести компонентов (α) биазеотропных смесей бутилпропионат–пропионовая кислота и бутилбутират–масляная кислота в присутствии сульфолана (рис. 6, 7).

Как видно из рис. 6 и 7, для смесей БП–ПК и ББ–МК эквимольного состава с увеличением концентрации СФ наблюдается заметный рост летучести эфира относительно кислоты. Следова-

тельно, возможно получение практически чистых эфиров в дистилляте колонн ЭР 2 и 4 (рис. 2).

На основании значений α для обеих пар компонентов БП–ПК и ББ–МК (рис. 6 и 7) было выбрано соотношение количеств разделяемой смеси и РА, равное 1:3. Подача сульфолана в колонны ЭР осуществлялась при давлении 300 мм рт. ст. и температуре 110°C (в случае колонны 2) и 130°C (в случае колонны 4).

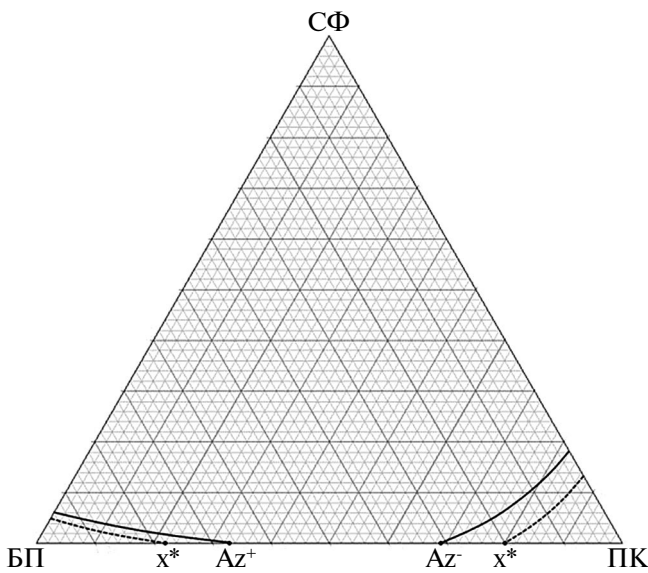


Рис. 4. Взаимное расположение различных изомногообразий (единичных $\alpha_{\text{БП-ПК}}$ -линий – сплошная полужирная линия, псевдоидеальных линий – штриховая линия) в концентрационном треугольнике системы БП–ПК–СФ при давлении 300 мм рт. ст.

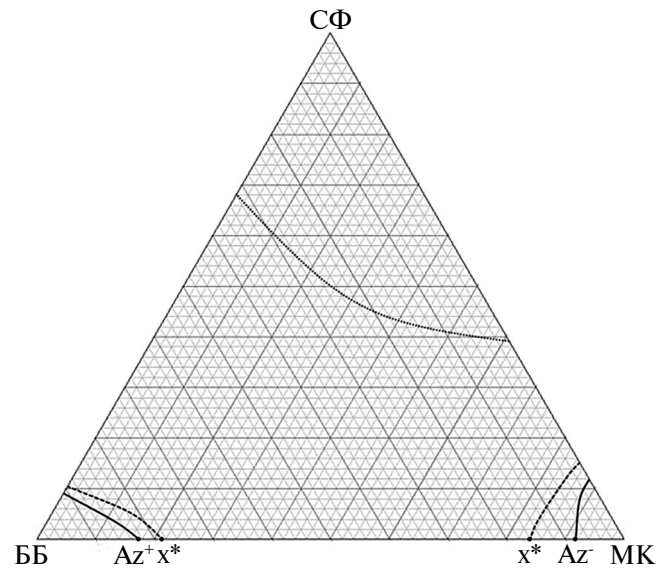


Рис. 5. Взаимное расположение различных изомногообразий (единичных $\alpha_{\text{ББ-МК}}$ -линий – сплошная полужирная линия, псевдоидеальных линий – штриховая линия, изотермо-изобары Банкрофта – пунктирная линия) в концентрационном треугольнике системы ББ–МК–СФ при давлении 300 мм рт. ст.

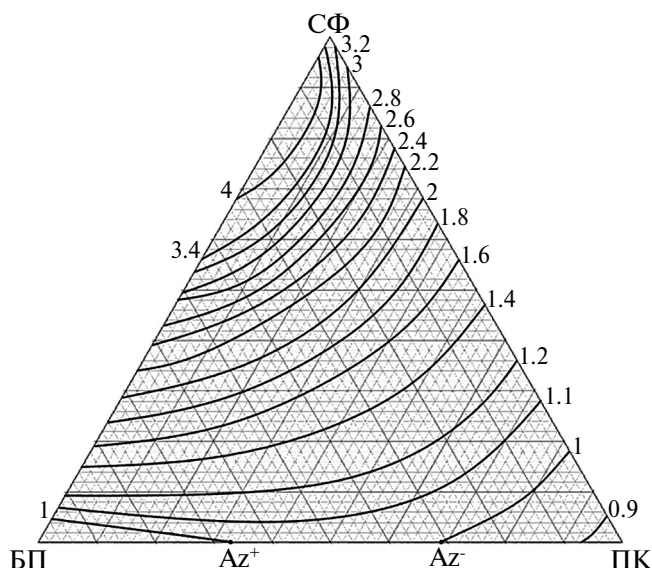


Рис. 6. Ход $\alpha_{\text{БП-ПК}}$ -линий в присутствии СФ при давлении 300 мм рт. ст.

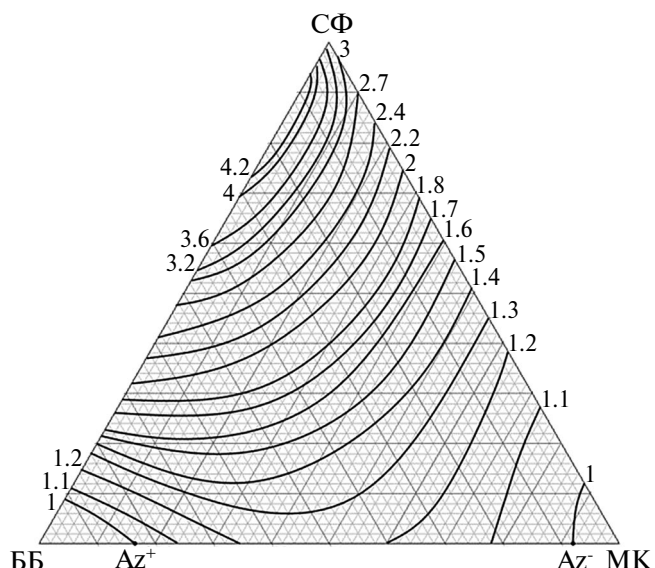


Рис. 7. Ход $\alpha_{\text{ББ-МК}}$ -линий в присутствии СФ при давлении 300 мм рт. ст.

Результаты расчетов комплексов экстрактивной ректификации биазетропных смесей бутилпропионат–пропионовая кислота и бутилбутират–масляная кислота с применением сульфолана, включающих колонны ЭР 2, 4 и колонны регенерации РА 3, 5 (рис. 2) также представлены в табл. 2. Из приведенных в таблице данных следует, что нам удалось разделить смесь бутилпропионат–пропионовая кислота–бутилбутират–масляная кислота с получением индивидуальных компонентов заданного качества. Суммарные затраты энергии на разделение смеси БП–ПК–ББ–МК в предложенной нами схеме составили 10 205.54 кВт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для разделения на индивидуальные компоненты смеси бутилпропионат–пропионовая кислота–бутилбутират–масляная кислота, имеющей промышленное значение и содержащей биазетропные составляющие БП–ПК и ББ–МК, предложена принципиальная технологическая схема, основанная на процессах фракционирования и экстрактивной ректификации.

На основе анализа взаимного расположения в концентрационных симплексах производных систем ряда изомногообразий, а также хода изолиний относительной летучести компонентов смесей БП–ПК и ББ–МК в присутствии сульфолана спрогнозирована и подтверждена расчетом эффективность применения экстрактивной ректификации для разделения указанных биазетропных составляющих.

Определены параметры работы ПТСР смеси БП–ПК–ББ–МК, обеспечивающие получение

индивидуальных компонентов чистотой не менее 0.9950 мол. д. при минимальных энергетических затратах в кипятильниках колонн.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}	коэффициенты бинарного взаимодействия уравнения NRTL
d_{ij}, e_{ij}, f_{ij}	
Az ⁺	положительный азеотроп
Az ⁻	отрицательный азеотроп
N	общее число тарелок в колонне, т. т.
N_F	номер тарелки подачи потока питания, т. т.
N_{PA}	номер тарелки подачи разделяющего агента, т. т.
P	давление, мм рт. ст.
$Q_{\text{теб}}$	энергетические затраты в кипятильниках колонн, кВт
R	флегмовое число
T	температура, °С
x	концентрация компонента в жидкой фазе, мол. д.
x^*	псевдоидеальная точка
α	коэффициент относительной летучести компонентов
γ	коэффициент активности

ИНДЕКСЫ

D	дистиллят
F	исходная смесь
i, j	номер компонента
W	кубовый продукт

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимофеев В.С., Серафимов Л.А., Тимошенко А.В. Принципы технологии основного органического и нефтехимического синтеза. М.: Высшая школа, 2010.
2. Жаров В.Т., Серафимов Л.А. Физико-химические основы дистилляции и ректификации. Л.: Химия, 1975.
3. Фролкова А.К., Фролкова А.В., Раева В.М., Жучков В.И. Особенности ректификационного разделения многокомпонентных смесей // Тонкие химические технологии. 2022. Т. 17. № 2. С. 87.
4. Фролкова А.К. Разделение азеотропных смесей. Физико-химические основы и технологические приемы. М.: ВЛАДОС, 2010.
5. Фролкова А.В., Пешехонцева М.Е., Гаганов И.С. Промежуточное заданное разделение при ректификации четырехкомпонентных смесей // Тонкие химические технологии. 2018. Т. 13. № 3. С. 41.
6. Пешехонцева М.Е., Маевский М.А., Гаганов И.С., Фролкова А.В. Области энергетического преимущества схем разделения смесей, содержащих компоненты с близкими летучестями // Тонкие химические технологии. 2020. Т. 15. № 3. С. 7.
7. Заббаров Р.Р., Гончарова И.Н., Рахматуллин Р.Р. Основные продукты нефтехимического синтеза для получения поверхностно-активных веществ. Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2017.
8. Волгодонский историко-экологический музей. Официальный сайт. [Электронный ресурс]. URL: http://veimmuseum.ru/construction_vhz.php (дата обращения: 29.09.2023).
9. Официальный сайт компании Beijing Amethyst Fine Chemical Technology Co., Ltd. [Электронный ресурс]. URL: www.zijingshi.com.cn (дата обращения: 29.09.2023).
10. Официальный сайт компании Zhengzhou Yizhiyuan Chemical Products Co., Ltd. [Электронный ресурс]. URL: www.sinochemmaterial.com (дата обращения: 29.09.2023).
11. Официальный сайт компании Polystar Engineering Plastics (Shanghai) CO., LTD. [Электронный ресурс]. URL: www.polystar-china.com/cnaboutpolystar.asp (дата обращения: 29.09.2023).
12. Официальный сайт компании Shandong Xingshi Chemical Sales Co., Ltd. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.xshgchem.com> (дата обращения: 29.09.2023).
13. Renon H., Prausnitz J.M. Local compositions in thermodynamic excess functions for liquid mixtures // AIChE J. 1968. V. 14. № 1. P. 135.
14. Митюшкина И.А. Разделение бинарных биазеотропных смесей с использованием дополнительных веществ различной летучести. Дис. ... канд. техн. наук. М.: МИТХТ, 2011.
15. Челюскина Т.В. Теоретические основы ректификационного разделения биазеотропных смесей. Дис. ... докт. техн. наук. М.: МИТХТ, 2011.
16. Hayden J.G., O'Connell J.P. A generalized method for predicting second virial coefficients // Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development. 1975. V. 14. № 3. P. 209.
17. Челюскина Т.В., Бедретдинов Ф.Н., Пронина Д.С. Исследование структуры фазовой диаграммы жидкость–пар системы бутилпропионат–пропионовая кислота–бутилбутират–масляная кислота // Теорет. основы хим. технологии. 2016. Т. 50. № 6. С. 657.
18. Chelyuskina T., Bedretdinov F., Pronina D. Mathematical modeling of vapor-liquid equilibrium of industrial mixture butyl propionate–propionic acid–butyl butyrate–butyric acid // Proceed. of the 43rd International Conference of Slovak Society of Chemical Engineering. Tatranske Matliare, 2016. P. 129.
19. Бедретдинов Ф.Н., Прудников С.А., Челюскина Т.В. Математическое моделирование процесса экстрактивной ректификации смеси бутилпропионат–пропионовая кислота // Химия и технология органических веществ. 2021. Т. 4. № 20. С. 32.
20. Челюскина Т.В., Бедретдинов Ф.Н. Математическое моделирование экстрактивной ректификации смеси бутилбутират–масляная кислота // Теорет. основы хим. технологии. 2016. Т. 50. № 5. С. 516.
21. Гайле А.А., Сомов В.Е. Сульфолан. Получение, свойства и применение в качестве селективного растворителя. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: ХИМИЗДАТ, 2014.
22. Wittig R., Lohmann J., Gmehling J. Vapor-liquid equilibria by UNIFAC group contribution. 6. Revision and extension // Ind. Eng. Chem. Res. 2003. V. 42. № 1. P. 183.
23. Полковниченко А.В., Челюскина Т.В. Ректификационное разделение промышленной смеси изобутилацетат–уксусная кислота–изоамилацетат // Теорет. основы хим. технологии. 2023. Т. 57. № 4. С. 433.
24. Анохина Е.А., Грачева И.М., Акишин А.Ю., Тимошенко А.В. Разделение смеси ацетон–хлороформ–н-бутанол с применением экстрактивной ректификации в схемах из двухотборных колонн // Тонкие химические технологии. 2017. Т. 12. № 5. С. 34.
25. Preißinger U., Ränger L.-M., Grützner T. Design considerations of a simplified multiple dividing wall column pilot plant // ChemEngineering. 2019. V. 3. № 2. P. 34.
26. Ränger L.-M., von Kurnatowski M., Bortz M., Grützner T. Multi-objective optimization of dividing wall columns and visualization of the high-dimensional results // Comput. ChemEngineering. 2020. V. 142. 107059.
27. Ränger L.-M., Grützner T. Shortcut method for initialization of dividing wall columns and estimating Pareto optimal NQ curves // ChemEngineering. Technol. 2021. V. 44. № 10. P. 1919.