

ВЗАИМОСВЯЗЬ ДИАГРАММЫ ФАЗОВОГО РАВНОВЕСИЯ И СТРУКТУР СХЕМ РАЗДЕЛЕНИЯ МНОГОФАЗНЫХ ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ

А.Ю. Себякин[@], аспирант, А.К. Фролкова, заведующий кафедрой

Кафедра химии и технологии основного органического синтеза, Московский технологический университет (Институт тонких химических технологий), Москва, 119571 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: a.sebyakin@yandex.ru

В настоящей работе исследованы структуры диаграмм фазового равновесия многофазных четырехкомпонентной систем: n-гексан (n-гептан, n-октан) – циклогексан – фурфурол – вода, характеризующихся наличием областей трехфазного расслаивания. На основе полученных данных: проведен синтез возможных вариантов схем разделения, подобраны рациональные режимы функционирования каждой из колонн, выбран энергетически выгодный вариант. Установлено, что использование предварительного расслаивания в системах с n-гексаном и n-октаном является энергоэффективным, причем выигрыш в случае октановой системы (эквимольная смесь) по сравнению с применением первого заданного разделения на первой стадии составляет более 25%. Определенные трудности (высокие значения эффективностей колонн: 60 и 40 теоретических тарелок) при разделении гексановой и гептановой систем связаны с близкими летучестями n-гексана (n-гептана) и циклогексана в окрестности точки чистого алкана.

Ключевые слова: *фазовое равновесие, расслаивание, азеотропия, математическое моделирование, область трехфазного расслаивания, принципиальная схема разделения.*

THE RELATIONSHIP BETWEEN THE STRUCTURE OF PHASE EQUILIBRIUM DIAGRAM AND THE STRUCTURE OF FLOWSHEET DIAGRAMS OF MULTIPHASE QUATERNARY MIXTURES SEPARATION

A.Yu. Sebyakin[@], A.K. Frolova

Moscow Technological University (Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow, 119571 Russia

[@] Corresponding author e-mail: a.sebyakin@mail.ru

In this work the structures of phase equilibrium diagrams of multiphase four-component systems n-hexane (n-heptane, n-octane) – cyclohexane – furfural – water were investigated. The systems are characterized by the existence of areas of three-phase separation. On the basis of the obtained data the synthesis of feasible variants of separation schemes was carried out, rational modes of functioning of each column were found, the energetically favorable variant was chosen. It was found that the use of preliminary phase separation in systems with n-hexane and n-octane is power-efficient, and the profit in case of the octane system (equimolar mixture) in comparison with the application of the first predetermined separation at the first stage is more than 25%. Certain difficulties (the high values of columns effectiveness: 60 and 40 theoretical plates) upon the separation of the hexane and heptane systems are due to the similar volatilities of n-hexane (n-heptane) and cyclohexane in the vicinity of the point of pure alkane.

Keywords: *phase diagram structure, limited solubility, azeotrope, mathematical simulation, three-phase separation region, separation flowsheet.*

Введение

Разделение многокомпонентных азеотропных смесей в большинстве случаев осуществляется методами, основанными на реализации принципа перераспределения полей концентраций (ПППК) [1]. Одним из приемов осуществления этого принципа является использование сочетания ректификации и самопроизвольного расслаивания в неоднородных разделительных комплексах. Данный прием во многих случаях обеспечивает значительную экономию энергозатрат на стадии выделения и очистки целевых продуктов.

В настоящий момент в литературе накоплен большой массив данных по фазовым равновесиям расслаивающихся смесей [2–4] и разделению бинарных и тройных смесей [5–7], характеризующихся наличием, как правило, областей двухфазного расслаивания, ограниченных в тройных системах бинодальными закрытого и открытого типа. В работе [8] авторами исследована структура диаграммы фазового равновесия четырехкомпонентной системы, включающей область равновесия трех жидких фаз. Проведен анализ эволюции трехфазного расслаивания внутри концентрационного тетраэдра, выявлена критическая нода, отвечающая переходу из трехфазной области в двухфазную. В работе [9] с использованием экспериментальных и расчетных методов исследовано фазовое равновесие в четырехкомпонентной системе вода – ацетонитрил – циклогексен – циклогексанон и ее бинарных и тройных составляющих. Определены параметры уравнения NRTL, адекватно описывающие равновесия жидкость–пар, жидкость–жидкость–пар, а также жидкость–жидкость–жидкость. На основе полученной модели изучена эволюция области трехфазного расслаивания внутри концентрационного тетраэдра и показана ее трансформация в двухфазную область через критическую ноду.

Настоящая работа посвящена изучению взаимосвязи структуры фазовой диаграммы четырехкомпонентных систем: *n*-гексан (Гс) – циклогексан (ЦГ) – фурфурол (Ф) – вода (В), *n*-гептан (Гп) – циклогексан (ЦГ) – фурфурол (Ф) – вода (В), *n*-октан (О) – циклогексан (ЦГ) – фурфурол (Ф) – вода (В) со структурой комплекса разделения смесей разного состава.

Расчетно-теоретическая часть

Очередность выделения компонентов или фракций из многокомпонентной смеси заданного состава однозначно определяется структурой диаграммы фазового равновесия. Ранее в работах [10, 11] было изучено парожидкостное равновесие, равновесие жидкость–жидкость, растворимость в тройных составляющих рассматриваемых в настоящей работе

систем, а именно: *n*-гексан – фурфурол – вода, *n*-гептан – фурфурол – вода, *n*-октан – фурфурол – вода и циклогексан – фурфурол – вода. Установлено, что указанные тройные системы содержат помимо областей двухфазного расслаивания обширную область равновесия трех жидких фаз.

Как следует из справочной информации [10, 12], четырехкомпонентные системы характеризуются наличием азеотропов:

- система *n*-гексан – циклогексан – фурфурол – вода содержит три бинарных гетероазеотропа;

- системы *n*-гептан (*n*-октан) – циклогексан – фурфурол – вода содержат четыре бинарных и один тройной гетероазеотроп.

Анализ соотношения температур кипения азеотропов и чистых компонентов позволил определить типы особых точек, число областей дистилляции и выделить сепаратрические многообразия. Типы и индекс Пуанкаре всех особых точек исследуемых систем относительно развертки (границы тетраэдра) и объема концентрационного симплекса представлены в табл. 1. Алгебраическая сумма индексов особых точек относительно границы и тетраэдра равна 2 и 0, соответственно, что находится в полном соответствии с правилом азеотропии [13].

Таким образом, можно сделать вывод, что структура фазовой диаграммы является термодинамически верной. На рис. 1 показаны развертки граничной поверхности тетраэдра с расположением особых точек и областей расслаивания.

Термодинамико-топологический анализ диаграмм парожидкостного равновесия четырехкомпонентных систем позволил выявить следующие закономерности:

- система *n*-гексан – циклогексан – фурфурол – вода имеет две области дистилляции, которые сформированы пучками дистилляционных линий, начинающихся в бинарном гетероазеотропе *n*-гексан – вода и заканчивающихся в точках чистых компонентов (вода, фурфурол);

- системы *n*-гептан (*n*-октан) – циклогексан – фурфурол – вода имеют три области дистилляции, которые сформированы пучками дистилляционных линий, начинающихся в бинарном гетероазеотропе циклогексан – вода и заканчивающихся в точках чистых компонентов (*n*-гептан (*n*-октан), вода, фурфурол).

Области дистилляции отделены друг от друга сепаратрическими многообразиями, структура которых приведена на рис. 2.

Одним из наиболее эффективных методов исследования физико-химических свойств смесей и процессов разделения является математическое моделирование и вычислительный эксперимент. Моделирование фазовых равновесий осуществлялось с использованием программного комплекса Aspen Plus и уравнения Ло

Таблица 1. Проверка выполнения правила азеотропии относительно развертки тетраэдра и объема тетраэдра

Особая точка	Относительно развертки		Относительно объема	
	Тип	Индекс Пуанкаре	Тип	Индекс Пуанкаре
<i>Система n-гексан (Гс) – циклогексан (ЦГ) – фурфурол (Ф) – вода (В)</i>				
Гс	CN ₁	0	-	-
ЦГ	CN ₁	0	-	-
Ф	N ₁ ^{уст}	+1	N ₁ ^{уст}	+1
В	N ₁ ^{уст}	+1	N ₁ ^{уст}	+1
ЦГ – В	N ₂ ^{неуст}	+1	N ₂ ^{неуст}	-1
ЦГ – В	CN ₂	0	-	-
Ф – В	C ₂	-1	C ₂	-1
		$\sum_i = 2$		$\sum_i = 0$
<i>Системы n-гептан (Гп) (n-октан (О)) – циклогексан (ЦГ) – фурфурол (Ф) – вода (В)</i>				
Гп (О)	N ₁ ^{уст}	+1	N ₁ ^{уст}	+1
ЦГ	CN ₁	0	-	-
Ф	N ₁ ^{уст}	+1	N ₁ ^{уст}	+1
В	N ₁ ^{уст}	+1	N ₁ ^{уст}	+1
Гп (О) – Ф	C ₂	-1	C ₂	-1
Гп (О) – В	C ₂	-1	C ₂	-1
ЦГ – В	N ₂ ^{неуст}	+1	N ₂ ^{неуст}	-1
Ф – В	C ₂	-1	C ₂	-1
Гп (О) – Ф – В	N ₃ ^{неуст}	+1	C ₃	+1
		$\sum_i = 2$		$\sum_i = 0$

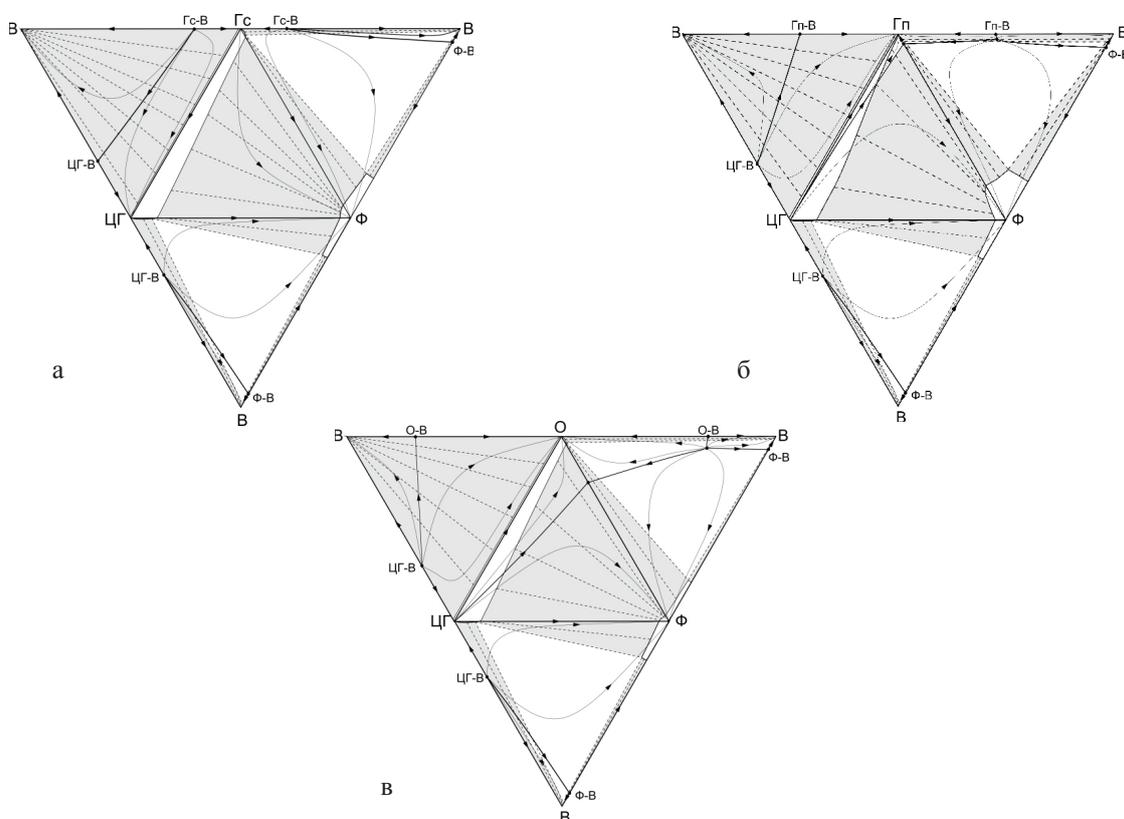


Рис. 1. Развертка тетраэдра системы: а) n-гексан – циклогексан – фурфурол – вода, б) n-гептан – циклогексан – фурфурол – вода, в) n-октан – циклогексан – фурфурол – вода (затонированы области двухфазного расслаивания).

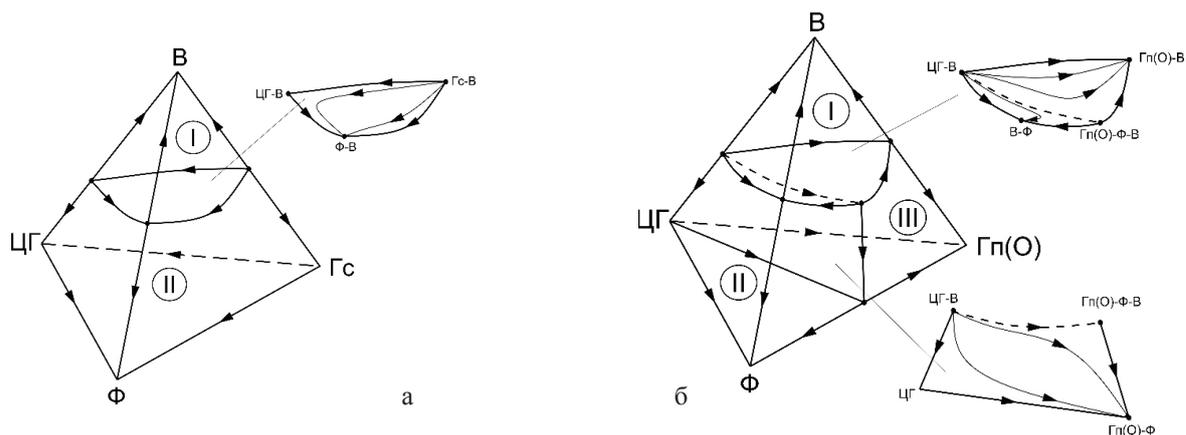


Рис. 2. Структура фазовой диаграммы и сепаратрических многообразий четырехкомпонентных систем:
 а) *n*-гексан – циклогексан – фурфурол – вода,
 б) *n*-гептан (*n*-октан) – циклогексан – фурфурол – вода
 (I, II, III – обозначение областей дистилляции).

кальных составов NRTL. Выбор уравнения обусловлен тем, что оно позволяет хорошо описывать как гомогенные смеси, так и смеси с ограниченной взаимной растворимостью компонентов [14]. При моделирова-

нии равновесия жидкость–пар и жидкость–жидкость использовали параметры уравнения NRTL, как содержащиеся в базе данных Aspen Plus, так и оцененные нами по экспериментальным данным (табл. 2).

Таблица 2. Параметры бинарного взаимодействия уравнения NRTL

Бинарная составляющая	Параметры бинарного взаимодействия				
	A_{ij}	A_{ji}	B_{ij} (K)	B_{ji} (K)	C_{ij}
<i>n</i> -гексан – циклогексан	0	0	-100.144	143.411	0.3061
<i>n</i> -гексан – фурфурол	-2.9757	-0.7813	1529.096	707.3496	0.2
<i>n</i> -гексан – вода	0	0	1512	3040	0.2
<i>n</i> -гептан – циклогексан	0	0	-13.636	31.3555	0.3024
<i>n</i> -гептан – фурфурол	-3.00422	-0.26458	1676.164	514.9026	0.248851
<i>n</i> -гептан – вода	-9.8652	10.5468	4795.66	440.7775	0.2
<i>n</i> -октан – циклогексан	0	0	-333.132	482.9905	0.2288
<i>n</i> -октан – фурфурол	0	0	581.0572	692.2884	0.2
<i>n</i> -октан – вода	-12.035	1.2166	5381.434	2997.701	0.2
циклогексан – фурфурол	-1.3399	-3.8477	700.5334	1870.461	0.2
циклогексан – вода	-10.4585	13.1428	4954.897	-1066.98	0.2
фурфурол – вода	112.6	52.8289	-4050	-2890	0.2

Адекватность математической модели проверялась сравнением полученных расчетных данных по азеотропии и составам равновесных слоев со справочными экспериментальными данными (табл. 3, 4). Моделирование парожидкостного равновесия осуществлялось при давлении 101.3 кПа, а равновесия жидкость–жидкость–жидкость при 20°C.

Применение параметров, имеющих в программном комплексе Aspen Plus, удовлетворительно описывает равновесие жидкость–жидкость–жидкость в тройной системе *n*-гептан – фурфурол – вода, но не моделирует наличие реально существующих бинарного (*n*-гептан – фурфурол) и тройного гетероазеотропов (*n*-гептан – фурфурол – вода) [10]. С

целью улучшения описания нами отдельно проведена оценка параметров уравнения NRTL по экспериментальным данным парожидкостного равновесия (ПЖР) для составляющей *n*-гептан – фурфурол. При моделировании с параметрами, оцененными по данным ПЖР, воспроизводится структура фазовой диаграммы системы *n*-гептан – фурфурол – вода (азеотропия, расслаивание), однако наблюдаются расхождения (0.9% отн.) между экспериментальными и расчетными составами углеводородного слоя в этой тройной системе. Необходимо отметить, что такая ошибка описания не критична, поскольку взаимное расположение сепаратрисы и симплекса расслаивания благоприятно с точки зрения реализации ПППК. Рас-

Таблица 3. Сравнение экспериментальных и расчетных данных по составам и температурам кипения бинарных и тройных азеотропов при 101.3 кПа

Составляющая	Температура, °С		Состав азеотропа, мол. д.	
	эксп. [10, 12]	расч.	эксп. [10, 12]	расч.
<i>Бинарные азеотропы</i>				
<i>n</i> -гексан – вода	61.6	61.43	0.79 0.21	0.7898 0.2102
<i>n</i> -гептан – вода	80.1	79.32	0.546 0.454	0.5453 0.4547
<i>n</i> -октан – вода	90.4	89.57	0.329 0.671	0.3194 0.6806
циклогексан – вода	69.5	69.49	0.7 0.3	0.699 0.301
<i>n</i> -гептан – фурфурол	98.3	98.16	0.945 0.055	0.9499 0.0501
<i>n</i> -октан – фурфурол	120.3	118.59	0.775 0.225	0.7526 0.2474
фурфурол – вода	97.9	98.45	0.092	0.0796 0.9204
<i>Тройные азеотропы</i>				
<i>n</i> -гептан–фурфурол – вода	79.7	79.31	0.535 0.030 0.435	0.54 0.007 0.443
<i>n</i> -октан – фурфурол – вода	90.2	88.73	0.273 0.054 0.673	0.2883 0.0752 0.6365

Примечание: температуры кипения чистых веществ, определенные по уравнению Антуана при давлении 101.3 кПа, °С: *n*-гексан – 68.7, *n*-гептан – 98.4, *n*-октан – 125.7, циклогексан – 80.78, фурфурол – 161.4, вода – 100.

Таблица 4. Составы сопряженных жидких фаз исследуемых трехкомпонентных систем при T=20°C, P=101.3 кПа

Компонент	Углеводородный слой, мол. д.		Водный слой, мол. д.		Фурфурольный слой, мол. д.	
	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.
<i>Система n-гексан – фурфурол – вода</i>						
<i>n</i> -гексан	0.964	0.959	следы	следы	0.01	0.051
фурфурол	0.036	0.039	0.016	0.016	0.791	0.810
вода	следы	0.003	0.984	0.984	0.198	0.138
<i>Система n-гептан – фурфурол – вода</i>						
<i>n</i> -гептан	0.965	0.974	следы	следы	0.009	0.067
фурфурол	0.035	0.025	0.016	0.015	0.809	0.800
вода	следы	следы	0.984	0.985	0.182	0.134
<i>Система n-октан – фурфурол – вода</i>						
<i>n</i> -октан	0.966	0.963	следы	следы	0.008	0.025
фурфурол	0.034	0.036	0.016	0.016	0.815	0.829
вода	следы	0.001	0.984	0.984	0.177	0.147

четные составы равновесных жидких слоев заведомо принадлежат разным областям ректификации, отличающимся составами продуктовых (кубовых) потоков.

Таким образом, с использованием полученной математической модели фазового равновесия можно

провести систематическое исследование различных вариантов схем разделения и подобрать рациональные режимы функционирования каждой из колонн. Ниже представлен синтез возможных схем разделения смесей разного состава. Наличие областей рас-

слаивания, покрывающих практически весь концентрационный симплекс, позволяет использовать на разных стадиях отгонные колонны [15], что заметно влияет на снижение энергозатрат.

*Система *n*-гексан – циклогексан – фурфурол – вода*

Анализ структуры фазовой диаграммы системы показал наличие двух областей дистилляции и трех подобластей ректификации (рис. 2а), каждой из кото-

рых можно поставить в соответствие некоторый набор принципиальных схем разделения (в зависимости от состава исходной смеси F_0). Схемы включают комплексы, основанные на сочетании ректификации и самопроизвольного расслаивания, а также отдельные колонны. На рис. 3 приведены структуры схем разделения исходных смесей, принадлежащих разным подобластям ректификации.

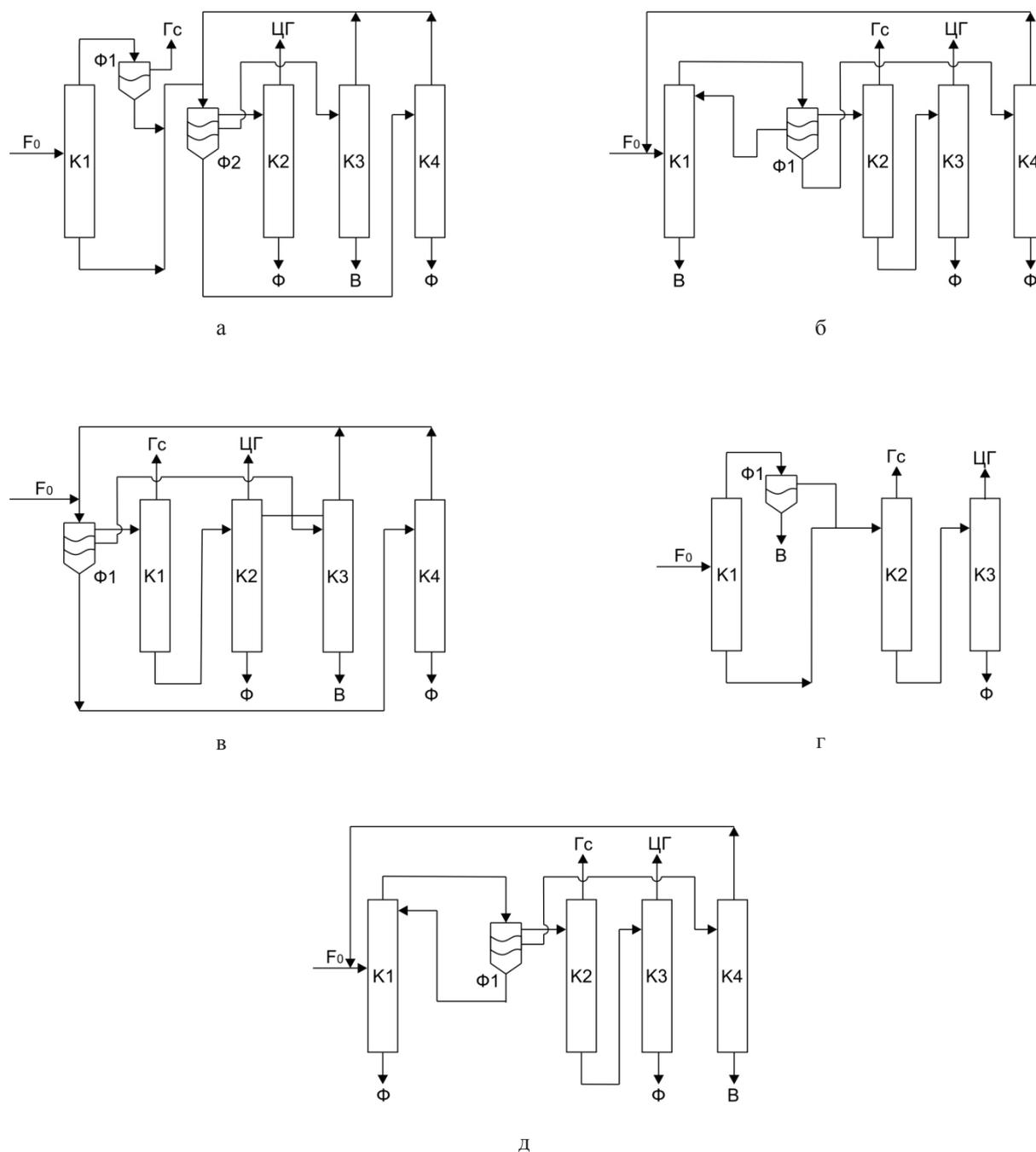


Рис. 3. Принципиальные технологические схемы разделения смеси *n*-гексан – циклогексан – фурфурол – вода с использованием функциональных комплексов (К1–К4 – ректификационные колонны; Ф1, Ф2 – флорентийские сосуды).

Варианты схем различаются применением первого или второго заданного разделения в колоннах, а также использованием явления расслаивания на первом этапе разделения (табл. 5). При разработке принципиальных схем было принято, что при соот-

ветствии качества слоя, образующего во флорентийском сосуде при расслаивании смеси *n*-гексан – вода, требованиям ТУ 2631-003-05807999-98 (рис. 3а, г) этот слой рассматривается как продуктовый поток (органический слой).

Таблица 5. Соответствие структуры схем разделения составу исходной смеси *n*-гексан – циклогексан – фурфурол – вода

Принадлежность исходной смеси		Режим работы первой колонны		Использование явления расслаивания
Область дистилляции	Подобласть ректификации	Первое заданное разделение	Второе заданное разделение	
I	I-1	3а	3б	3в
II	II-1		3г	
	II-2			

Как видно, смесь *n*-гексан – циклогексан – фурфурол – вода любого состава можно разделить с использованием четырех (трех) колонн и одного (двух) флорентийских сосудов. Работоспособность представленных схем была подтверждена расчетом процесса ректификации. Для этого нами для трех исходных смесей, относящихся к разным подобластям ректификации, был рассчитан материальный баланс схемы (определено число независимых переменных для расчета материального баланса [16], заданы их значения), а также подобраны

статические параметры работы ректификационных колонн, которые обеспечивают получение продуктов заданного качества, отвечающего требованиям ГОСТ/ТУ. В табл. 6 представлены статические параметры работы колонн и приведены суммарные энергозатраты на разделение (сумма величин нагрузок на ребойлеры колонн) при разделении смеси эквимолярного состава (принадлежит подобласти II-1). Ректификационные колонны работают при давлении 101.3 кПа, флорентийские сосуды – при температуре 20°C.

Таблица 6. Режимные параметры работы колонн и энергозатраты на разделение смеси *n*-гексан – циклогексан – фурфурол – вода эквимолярного состава

№ схемы (рис. 3)	№ колонны	Параметры работы колонны				Q _{реб.} , МВт	ΣQ, МВт
		N _{т.т.}	N _{пит.}	R	D/W		
3а	1	60	40	5.8	0.463	3.675	2.708
	2	40	39	0.7	9.398	0.72	
	3	10	1	-	0.525	0.229	
	4	16	1	-	0.325	0.212	
3д	1	10	1	-	3.542	0.848	2.973
	2	60	41	6.76	0.96	2.037	
	3	32	28	0.72	25.99	0.622	
	4	16	1	-	0.363	0.164	
3в	1	60	40	6.77	0.877	2.11	2.511
	2	32	28	0.87	6.933	0.828	
	3	16	1	-	0.521	0.211	
	4	12	1	-	0.332	0.221	

Обозначения: N_{т.т.} – число теоретических тарелок в колонне; N_{пит.} – тарелка питания колонны; R – флегмовое число; D/W – отношение количества потока дистиллата к кубовому потоку; Q_{реб.} – нагрузка на ребойлер колонны; ΣQ – суммарные энергозатраты на разделение.

Из табл. 6 видно, что наиболее энергоэффективной является схема с использованием предварительного трехфазного расслаивания смеси на первой стадии разделения. Как показал вычислительный эксперимент, такая тенденция наблюдается при разделении смеси любого состава. Стоит отметить, что при разделении смеси, находящейся в подобласти II-2 ректификации, возможно использование трех

ректификационных колонн (рис. 3г), но несмотря на меньшие по сравнению с другими вариантами разделения (3в, д) капитальные затраты, данная схема является более энергоемкой.

Системы n-гептан (n-октан) – циклогексан – фурфурол – вода

Системы *n*-гептан (*n*-октан) – циклогексан – фурфурол – вода характеризуются наличием трех

областей дистилляции и пяти подобластей ректификации (рис. 2б). На рис. 4 представлены принципиальные технологические схемы разделения смесей, отвечающих разным подобластям ректификации

(табл. 7). Для составляющей циклогексан – вода данных систем также имеется соответствие качества слоев, образующихся во флорентийском сосуде, требованиям ГОСТ/ТУ (рис. 4а, г, д, ж).

Таблица 7. Соответствие структуры схем разделения составу исходной смеси *n*-гептан (*n*-октан) – циклогексан – фурфурол – вода

Принадлежность исходной смеси		Режим работы первой колонны		Использование явления расслаивания
Область дистилляции	Подобласть ректификации	Первое заданное разделение	Второе заданное разделение	
I	I-1	4а	4б	4в
II	II-1		4г	
III	III-1	4а		
	III-2	4г		

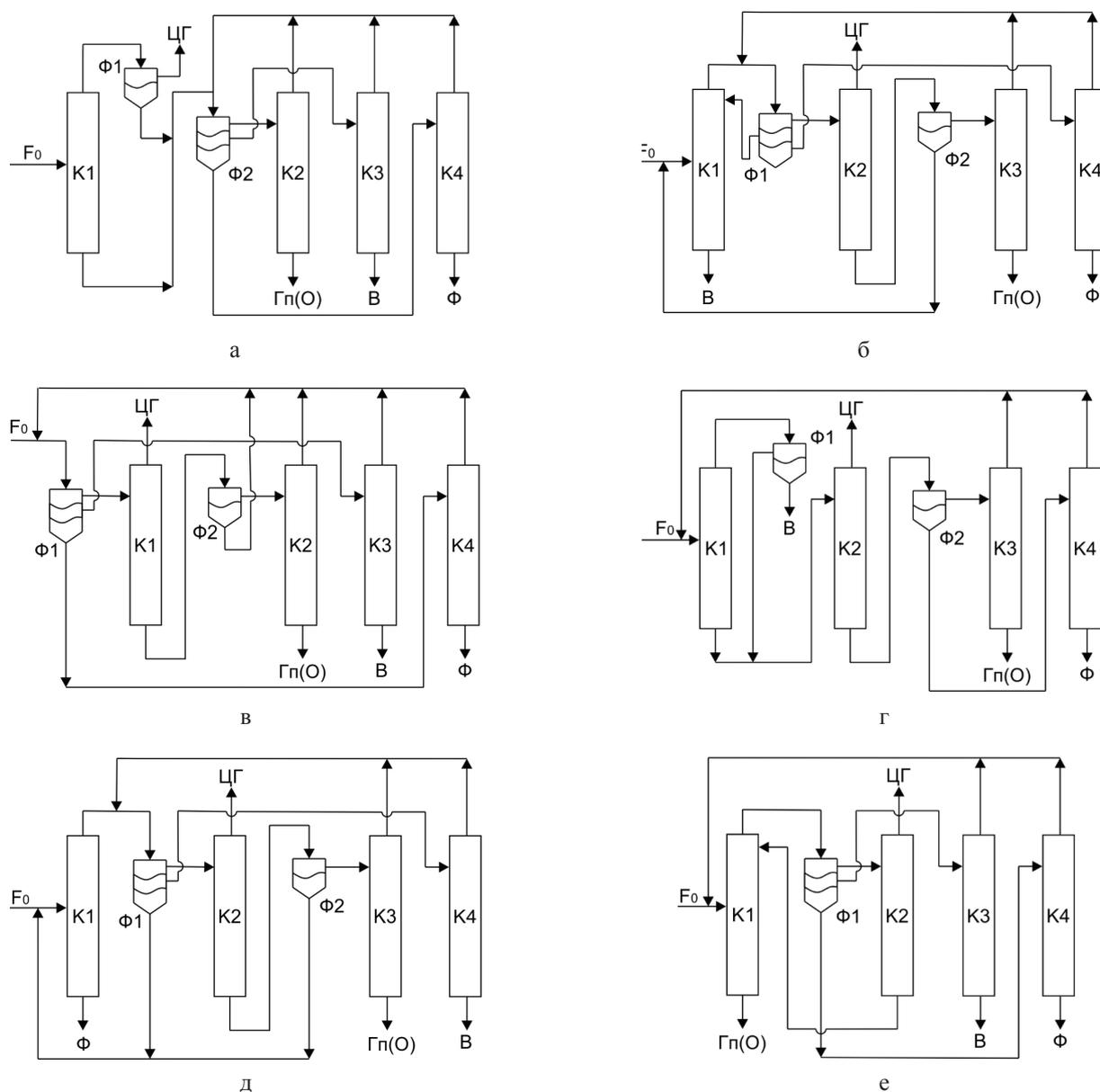


Рис. 4. Принципиальные технологические схемы разделения смеси *n*-гептан (*n*-октан) – циклогексан – фурфурол – вода с использованием функциональных комплексов (К1–К4 – ректификационные колонны; Φ1, Φ2 – флорентийские сосуды)

Как видно, смесь *n*-гептан (*n*-октан) – циклогексан – фурфурол – вода любого состава можно разделить с использованием четырех колонн и одного (двух) флорентийских сосудов. Как и в предыдущем случае, работоспособность представленных схем была подтверждена расчетом процесса ректификации. Для этого нами для пяти исходных смесей рассчитан материальный

баланс схемы и подобраны статические параметры работы ректификационных колонн. В табл. 8 представлены статические параметры работы колонн и приведены суммарные энергозатраты на разделение смесей эквимольного состава. Ректификационные колонны работают при давлении 101.3 кПа, флорентийские сосуды – при температуре 20°C.

Таблица 8. Режимные параметры работы колонн и энергозатраты на разделение смесей *n*-гептан (*n*-октан) – циклогексан – фурфурол – вода эквимольного состава

№ схемы (рис. 4)	№ колонны	Параметры работы колонны				Q _{реб.} , МВт	ΣQ, МВт
		N _{тт.}	N _{шт.}	R	D/W		
<i>Система n-гептан – циклогексан – фурфурол – вода</i>							
4а	1	60	25	4.85	0.557	1.934	4.511
	2	40	16	6.55	1.28	2.17	
	3	16	1	-	0.37	0.163	
	4	12	1	-	0.269	0.244	
4д	1	16	1	-	3.34	0.925	5.727
	2	60	25	5.56	0.332	1.91	
	3	40	16	5.35	1.67	2.65	
	4	16	1	-	0.260	0.242	
4в	1	60	25	5.43	0.316	1.893	5.161
	2	40	16	5.28	2.0	2.864	
	3	16	1	-	0.372	0.163	
	4	16	1	-	0.261	0.241	
<i>Система n-октан – циклогексан – фурфурол – вода</i>							
4а	1	32	14	1.92	0.577	0.982	1.708
	2	11	1	-	0.155	0.268	
	3	13	1	-	0.575	0.197	
	4	11	1	-	0.318	0.261	
4д	1	4	1	-	3.29	0.762	1.928
	2	32	23	1.5	0.666	0.571	
	3	9	1	-	0.415	0.380	
	4	15	1	-	0.525	0.215	
4в	1	32	20	1.46	0.777	0.559	1.327
	2	11	1	-	0.196	0.287	
	3	14	1	-	0.552	0.222	
	4	11	1	-	0.32	0.259	

Обозначения – см. табл. 6.

Из табл. 8 видно, что для разделения смеси *n*-гептан – циклогексан – фурфурол – вода наиболее энергоэффективной является схема с применением первого заданного разделения на первой стадии разделения. Для разделения смеси *n*-октан – циклогексан – фурфурол – вода наименее энергоемкой является схема с использованием предварительного трехфазного расслаивания смеси на первой стадии разделения.

Заключение

Исследованы особенности разделения четырехкомпонентных систем, один из компонентов которых принадлежит гомологическому ряду алканов, в разделительных комплексах, основанных на сочетании ректификации и расслаивания. Установлено, что использование предварительного расслаивания в системах с *n*-гексаном и *n*-октаном является энергоэффек-

тивным, причем выигрыш в случае октановой системы (эквимольная смесь) по сравнению с применением первого заданного разделения на первой стадии составляет более 25%. Определенные трудности (высокие значения эффективностей колонн: 60 и 40 теоретических тарелок) при разделении гексановой и гептановой систем связаны с близкими значениями летучести *n*-гек-

сана (*n*-гептана) и циклогексана в окрестности точки чистого алкана. В дополнение к этому, бинарная составляющая *n*-гептан – циклогексан характеризуется наличием тангенциального азеотропа.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10632).

Список литературы:

1. Серафимов Л.А., Фролкова А.К. // Теор. основы хим. технологии. 1997. Т. 31. № 2. С. 193–201.
2. Коган В.Б., Фридман В.М., Кафаров В.В. Равновесие между жидкостью и паром: справочное пособие. Л.: Наука, 1961. 642 с.
3. Фрэнсис А. Равновесие жидкость – жидкость: пер. с англ. / под ред. Д.С. Циклеса. М.: Химия, 1969. 240 с.
4. Sorensen J.M., Arlt W. Liquid-Liquid Equilibrium Data Collection. 3 parts / DECHEMA Chemistry Data Series, 1979, 1980.
5. Ooms T., Vreysen S., Baelen G.V., Gerbaud V., Rodriguez-Donis I. // Chem. Eng. Research and Design. 2014. V. 92. № 6. P. 995–1004.
6. Prayoonyong P., Jobson M. // Chem. Eng. Research and Design. 2011. V. 89. № 8. P. 1362–1376.
7. San-Jang Wanga S.-J., Huang K. // Chem. Eng. and Processing. 2012. V. 60. P. 65–76.
8. Себякин А.Ю., Фролкова А.К. // Теор. основы хим. технологии. 2016. Т. 50. № 2. С. 207–214.
9. Фролкова А.В., Балбенков С.А., Фролкова А.К., Акишина А.А. // Изв. РАН. Серия химическая. 2015. № 10. С. 2330–2336.
10. Колючкина Г.Я. Исследование в области разделения гетероазеотропных смесей: дис. ... канд. техн. наук. М.: МИТХТ, 1972. 131 с.
11. Сазонов В.П., Саркисов А.Г. // Журн. физ. химии. 1968. Т. 42. № 8. С. 2066–2070.
12. Огородников С.К., Лестева Т.М., Коган В.Б. Справочник по азеотропии. Л.: Химия, 1971. 848 с.
13. Серафимов Л.А. // Журн. физ. химии. 1968. Т. 42. № 1. С. 248–252.
14. Уэйлес С. Фазовые равновесия в химической технологии: в 2-х ч. / пер. с англ. Ч. 1. М.: Мир, 1989. 304 с.
15. Львов С.В. Некоторые вопросы ректификации бинарных и многокомпонентных смесей. М.: Изд. АН СССР, 1960. 166 с.
16. Фролкова А.В., Фролкова А.К., Клиндухова А.Г., Витюков С.А. // Тонкие хим. технологии. 2015. Т. 10. № 4. С. 22–28.

References:

1. Serafimov L.A., Frolkova A.K. // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 1997. V. 31. № 2. P. 193–201. (in Russ.)
2. Kogan V.B., Fridman V.M., Kafarov V.V. Ravnovesie mezhdru zhidkost'yu i parom [Equilibrium between liquid and vapor]: handbook. L.: Nauka, 1961. 642 p. (in Russ.)
3. Frenhsis A. Ravnovesie zhidkost' – zhidkost' (The equilibrium liquid – liquid): (trans. from Eng.) / Ed. by D.S. Tsikles. M.: Khimiya, 1969. 240 p. (in Russ.)
4. Sorensen J.M., Arlt W. Liquid-Liquid Equilibrium Data Collection. 3 parts / DECHEMA Chemistry Data Series, 1979, 1980.
5. Ooms T., Vreysen S., Baelen G. V., Gerbaud V., Rodriguez-Donis I. // Chem. Eng. Research and Design. 2014. V. 92. № 6. P. 995–1004.
6. Prayoonyong P., Jobson M. // Chem. Eng. Research and Design. 2011. V. 89. № 8. P. 1362–1376.
7. San-Jang Wanga S.-J., Huang K. // Chem. Eng. and Processing. 2012. V. 60. P. 65–76.
8. Sebyakin A.Yu., Frolkova A.K. // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2016. V. 50. № 2. P. 207–214. (in Russ.)
9. Frolkova A.V., Balbenov S.A., Frolkova A.K., Akishina A.A. // Russian Chemical Bulletin. 2015. № 10. P. 2330–2336. (in Russ.)
10. Kolyuchkina G.Ya. Issledovanie v oblasti razdeleniya geteroazeotropnykh smesey [Research in the field of separation of heterogeneous azeotropic mixtures]: abstract of the PhD. M.: MITHT, 1972. 131 p.
11. Sazonov V.P., Sarkisov A.G. // Russian Journal of Physical Chemistry A. 1968. V. 42. № 8. P. 2066–2070. (in Russ.)
12. Ogorodnikov S.K., Lesteva T.M., Kogan V.B. Spravochnik po azeotropii [Handbook on Azeotropy]. L.: Khimiya, 1971. 848 p. (in Russ.)
13. Serafimov L.A. // Russian Journal of Physical Chemistry. A. 1968. V. 42. № 1. P. 248–252. (in Russ.)
14. Uehjles S. Fazovye ravnovesiya v khimicheskoy tekhnologii [Phase equilibrium in chemical engineering]: in 2 parts / trans. from Engl. Ch. 1. M.: Mir, 1989. 304 p. (in Russ.)
15. L'vov S.V. Nekotorye voprosy rektifikacii binarnykh i mnogokomponentnykh smesey [Some problems of rectification of binary and multicomponent mixtures]. M.: Izd. AN SSSR, 1960. 166 p. (in Russ.)
16. Frolkova A.V., Frolkova A.K., Klindukhova A.G., Vityukov S.A. // Tonkie khimicheskie tekhnologii (Fine Chem. Technologies). 2015. V. 10. № 4. P. 22–28.