

УДК 544.351.3

ФАЗОВОЕ РАВНОВЕСИЕ В СИСТЕМЕ ОКТАДЕКАН–ПРОПАН/*n*-БУТАН

© 2024 г. И. Ш. Хабриев^а, В. Ф. Хайрутдинов^{а, б}, Т. Р. Ахметзянов^а, Л. Ю. Яруллин^а,
И. М. Абдулагатов^{а, с, д, *}

^аКазанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

^бИнженерно-внедренческий центр «Инжехим», Казань, Россия

^сДагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

^дИнститут проблем геотермии и возобновляемой энергии ОИВТ РАН, Махачкала, Россия

*e-mail: ilmutdina@gmail.com

Поступила в редакцию 05.06.2023

После доработки 27.08.2023

Принята к публикации 29.10.2023

В работе приведены результаты экспериментального исследования фазового равновесия (*PT*_{ху}-зависимости) системы *n*-октадекан–пропан/*n*-бутан для трех изотерм (403.15, 423.15, 443.15) К в интервале давлений (от 0.89 до 7.24) МПа с использованием оптической ячейки высокого давления. Полученные *PT*_{ху}-данные были использованы для оценки критических параметров смеси, где концентрации обеих фаз совпадают ($x=y$ при фиксированных *P* и *T*).

Ключевые слова: *n*-октадекан, пропан/*n*-бутановая смесь, фазовое равновесие, растворимость, критическая точка, фазовая диаграмма.

DOI: 10.31857/S0044453724040028, EDN: QFSMAV

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа является продолжением цикла работ авторов, посвященных исследованию термодинамических основ сверхкритических флюидных экстракционных (СКФЭ) процессов утилизации отходов [1–4], в том числе выделения углеводородов парафинового ряда из асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) в рамках очистки скважин от отложений [5]. При реализации процесса СКФЭ очистки нефтяных скважин от АСПО ключевую роль играет растворимость, т.е. фазовое равновесие жидкость–газ, или *PT*_{ху}-зависимость (где *x* — концентрация растворяемого вещества в жидкой фазе и *y* — в паровой фазе), компонентов АСПО в сверхкритических флюидных средах.

Данные о фазовом равновесии (*PT*_{ху}) крайне важны для проектирования процессов сепарации, для оптимизации и повышения эффективности процесса нефтеотдачи с помощью

сверхкритических флюидов. Сверхкритическая флюидная технология широко применяется в химической, нефтяной и пищевой промышленности. Помимо углекислого газа легкие углеводороды, такие как пропан и *n*-бутан, и их смеси широко используются как сверхкритический растворитель. Выбор эффективного растворителя и режимные характеристики сверхкритической флюидной технологии определяются на основе надежных и достоверных *PT*_{ху}-данных о фазовом равновесии в системах, участвующих в этих процессах. Моделирование фазового равновесия сложных систем является наиболее удобным инструментом для сокращения материальных расходов и времени на трудоемкие экспериментальные измерения. Поэтому надежные данные о фазовом равновесии нужны для моделирования таких систем, проверки надежности предсказания различных моделей, выявления недостатков и устранения их, совершенствования существующих моделей на основе новых,

надежных PT_{xy} -данных. Как известно, для разработки таких моделей необходимы параметры взаимодействия для смесей (правила смешения). Определение параметров бинарного взаимодействия требует точных данных о фазовом равновесии (PT_{xy}) в широком диапазоне температур. Поэтому данная работа имеет важное практическое и научное (фундаментальное) значения. n -Октадекан наряду с такими углеводородами, как нафталин [6], гексадекан [7], тетрадекан [8] и дифенил [9], является одним из связующих АСПО, но в то же время ценным компонентом. Растворимость (фазовое равновесие жидкость–газ) n -октадекана в сверхкритическом диоксиде углерода и пропане [10–12] относительно хорошо исследовано. Например, в работе [10] исследована растворимость двадцати пяти парафиновых модельных соединений, в том числе n -октадекана в сверхкритическом диоксиде углерода при (310 и 320) К и в диапазоне давлений (от 12 до 20) МПа. Eustaquio–Rincón и Trejo [11] экспериментально исследовали фазовое равновесие n -октадекана в сверхкритическом CO_2 при температурах от (310 до 353) К и давлениях (от 10 до 20) МПа. Измерения проводились на VLE-аппарате полупроточного типа. Они показали, что растворимость n -октадекана в сверхкритическом CO_2 возрастает по мере увеличения давления. Давление в системе было измерено с точностью ± 2 кПа, температура измерена с точностью ± 0.05 К, а состав определен с точностью ± 0.0002 мольные доли.

Экспериментальные исследования и моделирование растворимости n -октадекана и эквимольной смеси n -октадекан/фенантрен в сверхкритическом пропане приведены в работе [12]. Исследования проведены динамическим методом при двух температурах (390 и 420) К в интервале давлений (от 3.5 до 6) МПа. Результаты измерений хорошо согласуются с предсказанием модели. Как нам известно, других источников данных о фазовом равновесии исследуемых нами систем в литературе нет. Литературный поиск был проведен с использованием базы данных НИСТ [14]. В данной работе нами исследована фазовое равновесие (PT_{xy} -зависимость) n -октадекана в готовой для применения (коммерческой) сверхкритической бинарной смеси с известным составом 0.653 пропан/0.347 n -бутан при трех изотермах (403.15, 423.15, 443.15) К в интервале давлений (от 0.89 до 7.24) МПа с использованием оптической ячейки высокого давления.

Бинарные растворители удобны для практического использования тем, что путем изменения концентраций компонентов можно оптимально подобрать критические параметры смеси для приспособления ее в конкретные технологические условия. Пропан и n -бутан, а также их смесь являются хорошими растворителями для тяжелых углеводородов. Критические параметры (пропана: $T_{кр}=369.82$ К, $P_{кр}=4.247$ МПа; n -бутана: $T_{кр}=425$ К, $P_{кр}=3.797$ МПа) [7, 13, 14] и их смесей хорошо известны и являются относительно низкими, особенно критическое давление ($P_{кр}=4.31$ МПа) для смеси (0.653 пропан/0.347 n -бутан), используемой для данных исследований [6–9]. Полученные нами точные экспериментальные данные о фазовом равновесии n -октадекана в сверхкритической бинарной смеси пропан/ n -бутан, могут быть использованы для повышения эффективности экстракционного процесса удаления парафинов из АСПО и очистки скважины от отложений.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использован n -октадекан (CAS 593-45-3) марки «ч.д.а.» с долей основного продукта не менее 99.6 мас. %. Поставщик – компания «Реахим». Готовая к применению пропан- n -бутановая смесь имеет массовый состав: 65.3 % пропана и 34.7 % n -бутана (ООО «UralOrgSynthesis»). Критические параметры данной пропан/ n -бутановой смеси равны: $T_{кр}=390.25$ К, $P_{кр}=4.31$ МПа [6–9]. Измерения фазового равновесия (P – T – w_L – w_G -зависимости, где w_L – массовая доля n -декана в жидкой фазе и w_G – в паровой фазе) в системе n -октадекан + пропан/ n -бутан проводились статическим методом оптической ячейки высокого давления. Экспериментальная установка, методика измерений концентраций фаз, процедура отбора образца из газовой и жидкой фаз, оценка погрешностей измерений подробно описаны в наших предыдущих работах [6–9]. Ниже дается краткая информация о методе и процедуре измерений.

Экспериментальная установка (рис. 1) состоит из системы создания, регулирования и измерения давления и температуры, сосуда фазового равновесия, системы вакуумирования, системы перемешивания, отбора и сепарации образца, а также аналитической части для определения концентрации равновесных фаз.

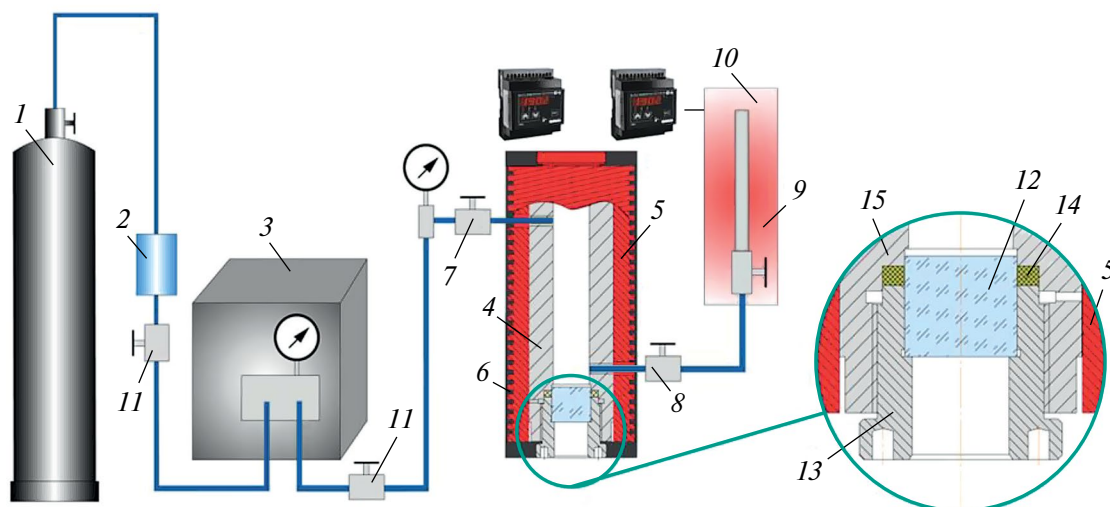


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования фазового равновесия бинарных систем с использованием оптической ячейки высокого давления: 1 – баллон, 2 – фильтр-осушитель, 3 – насос, 4 – оптическая ячейка высокого давления, 5 – медная рубашка, 6 – термоизоляция, 7 – вентиль для отбора верхней (газовой) фазы, 8 – вентиль для отбора нижней (жидкой) фазы, 9 – пробоотборник, 10 – термостатирующая ванна, 11 – вентиль, 12 – сапфировое окно, 13 – крышка ячейки, 14 – кольцо уплотнительное (резиновое с полиимидным покрытием), 15 – корпус ячейки.

Для проведения статического эксперимента оптическая ячейка заполняется на одну треть исследуемым веществом – *n*-октадеканом. Затем, чтобы избавиться от воздуха, вся система вакуумируется с помощью вакуумного насоса. Далее ячейку нагревали до нужной температуры и подавали в нее с помощью насоса высокого давления пропан/*n*-бутановую смесь с заданной концентрацией (65.3 мас. % пропана и 34.7 мас. % *n*-бутана) до достижения требуемого экспериментального значения давления. В целях быстрого достижения равновесия в двухфазной системе содержимое оптической ячейки подвергали интенсивному перемешиванию в течение 30–40 мин, используя специальный механизм перемешивания. Факт достижения состояния термодинамического равновесия в системе устанавливали одним или двумя контрольными опытами с помощью отбора проб на анализ и/или по изменению давления оптической ячейки. Постоянство (стабильность) давления и температуры в пределах флуктуаций, а также устойчивость границы раздела фаз жидкость–газ принимались как критерии достижения термодинамического равновесия в системе. После установления фазового равновесия (приблизительно через 30–40 мин) перемешивание прекращается и проводится отбор образца из жидкой или паровой фаз (см. ниже) при постоянных *P* и *T*. Затем отобранные фазы разделяются на жидкую (*n*-октадекан) и газообразную (пропан/*n*-бутан) фазы при комнатной температуре

(см. также ниже). Концентрация разделенных фаз определялись методом взвешивания пустого (до отбора) и заполненного (после отбора) контейнера (пробоотборника). Окончательное уравнение для расчета концентраций фаз в массовых долях (w_L и w_G) имеет вид:

$$w_L / w_G = \frac{m_{C_{18}}}{m_{C_3+C_4} + m_{C_{18}}}, \quad (1)$$

где $m_{C_{18}}$ и m_{C_3/C_4} – массы разделенных *n*-октадекана и смеси пропан/*n*-бутан соответственно. Суммарная расширенная ($k = 2$) абсолютная погрешность измерения температуры равна 0.15 К, а относительные погрешности измерений давления и концентраций фаз, при доверительной вероятности 0.95, равны 0.002 (или 0.2 %) и 0.03 (или 3 %) соответственно. Оценка погрешностей измеряемых величин (температуры, давления, концентрации компонентов) проводилась по методике, рекомендованной НИСТ [15].

МЕТОДИКА ОТБОРА ПРОБ И ПРОЦЕДУРА РАЗДЕЛЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ

Процедура отбора образца

Отбор проб (т.е. массы, отбираемой из сосуществующих равновесных фаз исследуемой системы) из закрытой равновесной VLE-ячейки

высокого давления приводился после установления полного фазового равновесия между сосуществующими фазами (см. выше). После завершения отбора из-за перепада давления фазовое равновесие в системе нарушается. Перед следующим измерением система заново приводится в состояние фазового равновесия при ином давлении P (T при этом постоянная, изотермический процесс VLE-измерения). При этом составы фаз также меняются. Через некоторое время при раскачивании системы для интенсивного перемешивания и ожидания 30–40 мин, когда система полностью перемешается, давление выходит на плато в пределах флуктуаций. Перед отбором проб из сосуществующих фаз систему оставляем некоторое время (30 мин) без перемешивания для полного разделения фаз. Процесс разделения может продолжаться некоторое время, даже после установления равенства температур и давлений сосуществующих фаз. В противном случае образец может быть неоднородным: содержать часть материала (компонента) из другой фазы.

Процедура разделения компонентов

Процедуру разделения экстрагированного образца (пробы), который представляет собой смесь n -октадекана и смеси пропан/ n -бутан, на газообразные (пропан/ n -бутановую смесь) и твердые или жидкие (n -октадекан) компоненты в зависимости от температуры разделения проводили путем охлаждения пробоотборника до 294 К (при комнатной температуре). Извлеченный образец выдерживали при 294 К в течение 40 мин для полного отделения газообразной смеси (пропан/ n -бутан) от твердого n -октадекана (температура плавления n -октадекана T_m — между 301 и 303 К). При этой температуре n -октадекан, предварительно растворенный в сверхкритической (пропан/ n -бутан) смеси, осаждается в тяжелую (конденсируемую) твердую фазу и легкая (неконденсируемая) газофазная (пропан/ n -бутановая) смесь отделяется от твердой фазы (n -октадекана). Для полного удаления газофазной (пропан/ n -бутановой) смеси из твердого n -октадекана после выпуска первой партии пропан/ n -бутановой смеси в пробоотборнике создают вакуум для удаления остатков пропан/ n -бутанового газа, растворенного в твердой фазе (n -октадекан) при комнатной температуре. Эта процедура

обеспечивает полное удаление всей газовой фазы (пропан/ n -бутана) из твердого n -октадекана. Экспериментально установлено, что оптимальной температурой для разделения газовой (пропан/ n -бутан) и твердой (n -октадекан) фаз является комнатная температура (294 К). Мы попытались проводить разделение летучей и конденсируемой фаз при различных температурах выше и ниже температуры плавления. При этом существенной разницы в определении концентрации n -октадекана мы не обнаружили. Во избежание возможного удаления n -октадекана вместе с паровой фазой при его выпуске из пробоотборника на его выходной клапан была установлена ловушка для частиц твердой фазы. Таким образом, в данном исследовании мы предположили, что паровая фракция, удаляемая из экстрагированного образца, практически не содержит n -октадекана. Это предположение было дополнительно проверено хроматографическими анализами как жидкой, так и паровой фаз. Поэтому предлагаемый метод не требует хроматографического анализа составов выделенных проб, так как непосредственно определяется масса паровой и жидкой фаз (гравиметрическим способом, см. ниже). Хроматографический анализ использовался в данной работе только для проверки (подтверждения) гравиметрического анализа путем определения наличия следов каждого компонента в разделенных образцах (пропан/ n -бутан) и n -октадекана.

В настоящей работе мы измеряли составы газовой и жидкой фаз в системе n -октадекан + пропан/ n -бутан в весовых, а не в мольных долях. Определение состава в мольных долях n -октадекана и компонентов пропан/бутановой смеси в данном методе является проблемой, так как в рамках данного метода невозможно точно определить соотношение пропан/ n -бутан в жидкости и паровой фазе. Нет гарантии, что соотношение пропан/ n -бутан будет постоянным при любых экспериментальных температурах и давлениях. В этом случае очень полезно использовать комбинированные, как гравиметрические, так и хроматографические, методы для точного измерения мольных долей компонентов в газовой и жидкой фазах. Поэтому в настоящей работе мы приводим только массовые доли n -октадекана и смеси пропан/ n -бутан в газовой и жидкой фазах, т.е. проводили исследования фазового равновесия (или растворимость

n-октадекана в сверхкритической бинарной смеси пропан/*n*-бутан с заданной концентрацией) в системе *n*-октадекана + пропан/*n*-бутан в массовых долях *n*-октадекана и пропан/*n*-бутана, без разделения концентраций пропана и *n*-бутана (см. табл. 1).

Согласно данной процедуре, отбор проб из газовой и жидкой фаз производится отдельно, т.е. при изотермических условиях и разных давлениях. После быстрого отбора проб из любой фазы (газовой или жидкой с помощью разных клапанов) при заданных *T* и *P* фазовый равновесный состав компонентов и давление смещаются (изменяются). Следовательно, в данном методе следующий отбор проб из другой фазы при тех же *T* и *P* условиях становится невозможным. Поэтому следующий отбор проб производился после перемешивания образца в течение 30–40 мин с использованием качающего механизма и достижения равновесного состояния при других экспериментальных *T* и *P* условиях. Через некоторое время (примерно

30–40 мин) давление выходит на плато и перемешивание прекращается. После достижения равновесия при других *P* и *T* условиях проводим отбор проб из паровой или жидкой фаз и анализируем их состав путем разделения компонентов. Для удобства анализ фаз (жидкой или газовой) проводили отдельно при различных *T* и *P* условиях.

ПРОЦЕДУРА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ КОМПОНЕНТОВ СОСУЩЕСТВУЮЩИХ РАВНОВЕСНЫХ ФАЗ

Для отбора проб использовался пробоотборник относительно большого объема 4.1 см³ для уменьшения экспериментальной погрешности в определении составов (масс компонентов взвешиванием). Гравиметрический метод был использован для определения концентраций компонентов смеси в жидкой и паровой фазах, отобранных из оптической ячейки высокого

Таблица 1. Экспериментальные данные (*P–T–w_L–w_G*) по фазовому равновесию системы *n*-октадекан–пропан/*n*-бутан

<i>P</i> , МПа	<i>C</i> _{<i>n</i>-октадекан} , мас. доля	<i>C</i> _{пропан/<i>n</i>-бутан} , мас. доля
<i>T</i> = 403.15 К		
Паровая фаза		
0.98	0.271	0.729
1.68	0.036	0.964
2.24	0.034	0.966
2.80	0.025	0.975
3.53	0.017	0.983
4.29	0.011	0.989
4.91	0.105	0.895
Жидкая фаза		
0.89	0.936	0.064
1.31	0.898	0.102
1.64	0.867	0.133
2.01	0.834	0.166
2.69	0.747	0.253
2.83	0.725	0.275
3.51	0.622	0.378
4.46	0.424	0.576
4.60	0.389	0.611
5.06	0.244	0.756
423.15 К		

P , МПа	$C_{\text{н-октадекан'}}$ мас. доля	$C_{\text{пропан/н-бутан'}}$ мас. доля
Паровая фаза		
1.10	0.260	0.740
1.61	0.095	0.905
2.49	0.017	0.983
3.34	0.008	0.992
4.04	0.014	0.986
4.73	0.014	0.986
5.53	0.024	0.976
6.11	0.048	0.952
Жидкая фаза		
1.02	0.940	0.060
1.39	0.917	0.083
1.73	0.879	0.121
2.51	0.811	0.189
3.32	0.732	0.268
4.03	0.658	0.342
4.84	0.558	0.442
5.62	0.417	0.583
5.87	0.356	0.644
6.16	0.279	0.721
443.15 К		
Паровая фаза		
1.07	0.232	0.768
1.52	0.133	0.867
2.15	0.022	0.978
2.77	0.019	0.981
3.25	0.017	0.983
4.08	0.014	0.986
4.79	0.018	0.982
5.60	0.026	0.974
6.42	0.047	0.953
7.24	0.109	0.891
Жидкая фаза		
0.89	0.972	0.028
1.52	0.932	0.068
2.02	0.903	0.097
2.66	0.860	0.140
3.63	0.788	0.212
4.45	0.724	0.276
5.27	0.641	0.359
6.03	0.566	0.444
6.84	0.476	0.524
7.37	0.353	0.647

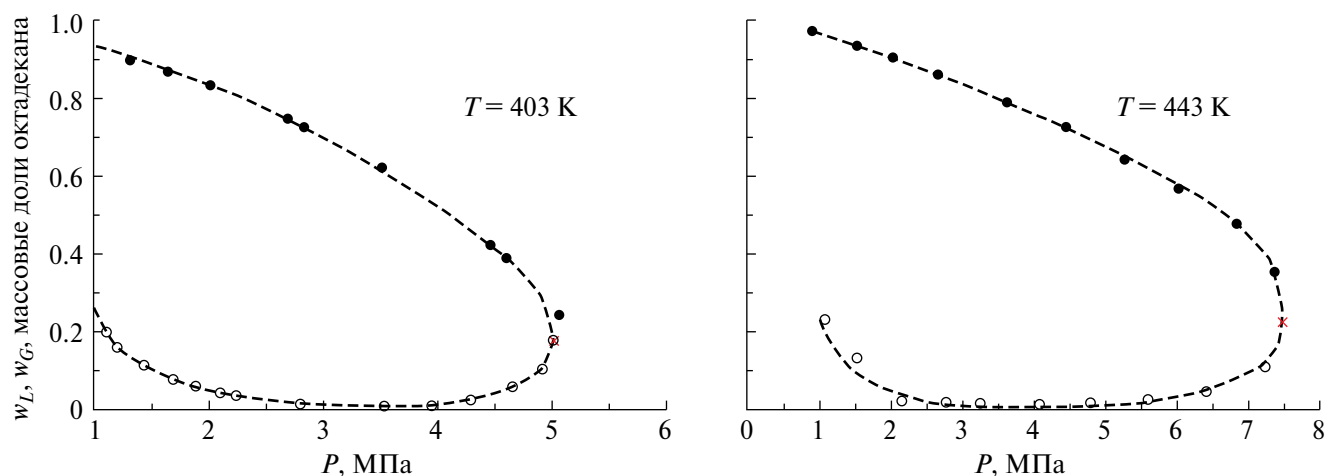


Рис. 2. Изотермическая $P-w_L-w_G$ фазовая диаграмма системы n -октадекан–пропан/ n -бутан: w_L – массовая доля n -октадекан в жидкой фазе (белые кружочки); w_G – массовая доля n -октадекан в паровой фазе (темные кружочки) при двух температурах. Пунктирные линии – интерполяционные значения.

давления. Составы фаз определяли следующим образом. Перед отбором проб пустой пробоотборник взвешивали на электронных весах Vibra с погрешностью 10^{-4} г. Затем взвешивали пробоотборник вместе с отобранной пробой. Извлеченный из ячейки фазового равновесия образец в пробоотборнике представляет собой смесь (пропан/ n -бутан) в качестве растворителя и n -октадекана в качестве растворенного вещества. Смесь (пропан/ n -бутан) была отделена от n -октадекана по методике, описанной выше (см. также некоторые подробности в наших предыдущих публикациях [6–9]). Массу разделенной смеси (пропан/ n -бутан) в пробоотборнике определяли как разницу между заполненным и пустым пробоотборником. Аналогично определяли массу n -октадекана, т.е. рассчитывали ее как разницу между массой вещества, оставшегося после полного выхода паровой фазы (смеси пропан/ n -бутан), и массой пустого пробоотборника. Массовые доли n -октадекана в жидкой или паровой фазах определяли согласно (1). Более подробная процедура отбора, разделения компонентов и определения их концентрации приведена в наших предыдущих работах [6–9].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты экспериментального исследования фазового равновесия системы октадекан–пропан/ n -бутан с использованием оптической ячейки высокого давления приведены на рис. 2 и в табл. 1.

На основе полученных экспериментальных $P-T-w_L-w_G$ -данных были определены значения критических параметров n -октадекан+пропан/ n -бутановой смеси из условия, где концентрации обеих (жидкости и газа) фаз совпадают ($x=y$ или $w_L=w_G$) при фиксированных значениях P и T , используя графоаналитический метод. Полученные значения критических параметров приблизительно равны: $w=0.178$ массовая доля n -октадекана, $T_c=403.15$ К, $P_c=5.08$ МПа; $w=0.198$ массовая доля n -октадекана, $T_c=423.15$ К, $P_c=6.45$ МПа; $w=0.225$ массовая доля n -октадекана, $T_c=443.15$ К, $P_c=7.49$ МПа.

На рис. 3 приведена $P-T$ -фазовая диаграмма системы n -октадекан + пропан/ n -бутановой смеси вместе с критической кривой в P_c-T_c -проекции и кривыми давления насыщенных паров чистых компонентов [13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе экспериментально исследовано фазовое равновесие ($P-T-w_L-w_G$ -зависимость) системы n -октадекан–пропан/ n -бутан для трех значений температур (403.15, 423.15, 443.15) К в интервале давлений (от 0.89 до 7.24) МПа с использованием оптической ячейки высокого давления. На основе полученных экспериментальных значений $P-T-w_L-w_G$ были определены значения критических параметров смеси на критической кривой системы n -октадекан + пропан/ n -бутан: $w=0.178$ массовые доли n -октадекана, $T_c=403.15$ К, $P_c=5.08$ МПа;

$w = 0.198$ массовые доли *n*-октадекана, $T_c = 423.15$ К, $P_c = 6.45$ МПа; $w = 0.225$ массовые доли *n*-октадекана, $T_c = 443.15$ К, $P_c = 7.49$ МПа. С практической точки зрения, замена растворителя/экстрагента – сверхкритического диоксида углерода на пропан/*n*-бутановую смесь позволяет значительно (почти в 2 раза) уменьшить давление процесса сверхкритической флюидной экстракции (СКФЭ) и улучшить растворяющие способности *n*-октадекана в пропан/*n*-бутановой смеси. Поэтому готовая к употреблению (имеющаяся коммерчески) пропан/*n*-бутановая смесь может быть рекомендована для коммерческого применения в СКФЭ-процессах.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Нанотехнологии и наноматериалы» ФГБОУ ВО «КНИТУ».

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10129, <https://rscf.ru/project/22-79-10129/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Khairutdinov V.F., Akhmetzyanov T.R., Gabitov F.R. et al.* // Petroleum Science and Technology. 2016. Т. 34. № 4. Р. 372.
2. *Khairutdinov V.F., Gumerov F.M., Zaripov Z.I. et al.* // Pet. Sci. Tech. 2019. Т. 37. № 3. Р. 290.
3. *Хайрутдинов В.Ф., Гумеров Ф.М., Хабриев И.Ш. и др.* // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 9. С. 4.
4. *Khairutdinov V.F., Akhmetzyanov T.R., Gumerov F.M. et al.* // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2017. Т. 51. № 3. Р. 299.
5. *Хайрутдинов В.Ф., Салихов И.З., Гумеров Ф.М. и др.* // Сверхкритические флюиды: теория и практика. 2021. Т. 16. № 2. С. 51.
6. *Khairutdinov V.F., Gumerov F.M., Khabriev I.S. et al.* // Fluid Phase Equilibria. 2020. V. 510. 112502.
7. *Khairutdinov V.F., Gumerov F.M., Zaripov Z.I. et al.* // The J. of Supercritical Fluids. 2020. V. 156. 104628.
8. *Khairutdinov V.F., Gumerov F.M., Khabriev I.S. et al.* // Fluid Phase Equilibria. 2023. V. 564. 113615.
9. *Khairutdinov V.F., Khabriev I.S., Akhmetzyanov T.R. et al.* // J. Molecular Liquids. 2021. V. 342. 117541.
10. *Schmitt W.J., Reid R.C.* // Chem. Eng. Communications. 1988. V. 64. № 1. Р. 155.
11. *Eustaquio-Rincón R., Trejo A.* // Fluid Phase Equilibria. 2001. V. 185. Р. 231.
12. *Dimitrelis D., Prausnitz J.M.* // J. Chem. Eng. Data. 1989. V. 34. № 3. Р. 286.
13. *Lemmon E.W., Huber M.L., McLinden M.O.* NIST Standard Reference Database 23, NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties, REFPROP, version 10.0, Standard Reference Data Program. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. 2018.
14. *Frenkel M., Chirico R., Diky V. et al.* NIST Thermo Data Engine, NIST Standard Reference Database 103b-Pure Compound, Binary Mixtures, and Chemical Reactions, Version 5.0. National Institute of Standards and Technology, Boulder, Colorado – Gaithersburg, MD. 2010.
15. *Taylor B.N., Kuyatt C.E.* // Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results; NIST Technical Note 1297. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg. 1994.

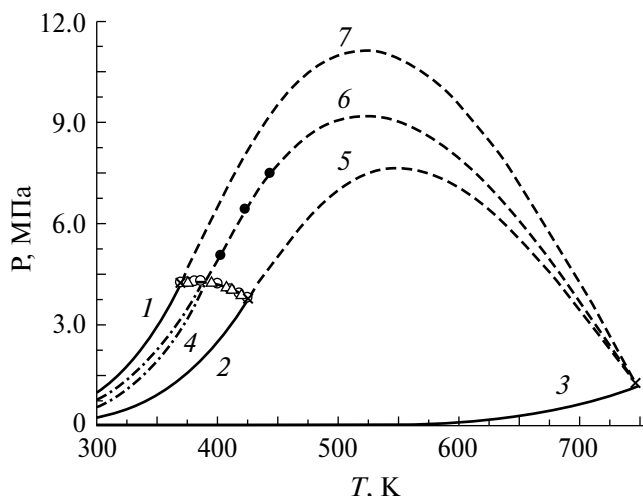


Рис. 3. *P–T*-фазовая диаграмма тройной системы *n*-октадекан + (0.347 пропан/0.653 *n*-бутан) и бинарных подсистем *n*-октадекан + пропан и *n*-октадекан + *n*-бутан. Сплошные линии – давления насыщенных паров чистых компонент (пропан – 1, *n*-бутан – 2, и *n*-октадекан – 3), рассчитанных из REFPROP [13]; ' – критические точки чистых компонент; • – критические параметры смеси *n*-октадекан + (0.347 пропан/0.653 *n*-бутан) (данная работа); (о и △) – критические параметры бинарной системы пропан/*n*-бутан [6–8]. Штрихпунктирная кривая (4) – *P–T*-фазовая диаграмма пропан + *n*-бутан системы, рассчитанной по GERG-модели [13]. Пунктирные кривые – критические кривые подсистем *n*-октадекан + *n*-бутан (5), смеси *n*-октадекан + (0.347 пропан/0.653 *n*-бутан) (6) и *n*-октадекан + пропан (7).