

ФАЗОВОЕ РАВНОВЕСИЕ БИНАРНОЙ СИСТЕМЫ ДЕКАЛИН—ДИОКСИД УГЛЕРОДА

И.Ш. Хабриев — Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия. ORCID: 0000-0002-0327-0343. Эл. почта: termi0@yandex.ru

И.М. Гильмутдинов — Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия. ORCID: 0000-0003-4241-6306. Эл. почта: gilfar1982@gmail.com

Л.Ю. Яруллин — Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия. ORCID: 0000-0003-1371-6721. Эл. почта: yarul.lenar@gmail.com

В.Ф. Хайрутдинов — Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия. ORCID: 0000-0002-8137-6450. Эл. почта: kvener@yandex.ru (для переписки)

Ф.М. Гумеров — Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия. ORCID: 0000-0002-3806-2165. Эл. почта: gum@kstu.ru

©2022 г. Поступила в редакцию 24.08.2022 г. Прошла рецензирование 15.09.2022 г.
Принята к публикации 15.09.2022 г.

При исследовании фазового равновесия бинарной системы декалин—диоксид углерода, осуществленного на изотермах 313 и 333 К и в диапазоне давлений 2—15 МПа с использованием оптической ячейки высокого давления, установлен II тип фазового поведения. Экспериментальные результаты описаны с использованием уравнения состояния Пенга—Робинсона.

К л ю ч е в ы е с л о в а: декалин, диоксид углерода, фазовое равновесие, растворимость, термодинамическая модель, уравнение Пенга—Робинсона.

ВВЕДЕНИЕ

Данные по фазовому равновесию являются ключевыми параметрами при реализации новых и модернизации существующих сверхкритических флюидных (СКФ) технологий, в основе которых заложены такие СКФ-процессы как экстракция [1—3], импрегнация [4—7], химические реакции [8—9], сушка [10] и диспергирование [11, 12]. Так, например, при выборе режимных параметров осуществления процесса СКФ-диспергирования по методу антирастворителя необходима ориентация на однофазную область бинарной системы органический растворитель—диоксид углерода [11, 13], которая характеризуется высоким массообменом. Это, в свою очередь, определяет высокую степень пересыщения и формирование большего количества центров зародышеобразования и, соответственно, образования частиц более мелкого размера [13].

Объектом исследования в настоящей работе выбрана бинарная система декалин—диоксид углерода. Выбор декалина связан с тем, что он является хорошим растворителем для многих органических соединений и полимеров, в частности, для сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ). Данные

по фазовому равновесию позволят в дальнейшем осуществить процесс СКФ-диспергирования СВМПЭ по методу антирастворителя в оптимальных термодинамических условиях.

Научная литература располагает данными по фазовому равновесию бинарных систем декалин—диоксид углерода [14—17], декалин—метан [18, 19] и декалин—пропан [20]. В работе [14] представлены результаты для жидкостной фазы системы диоксид углерода—*транс*-декалин при относительно низких давлениях (до 7 МПа). В [15] получены данные по растворимости CO₂ в *транс*-декалине в диапазоне температур от 323 до 423 К при давлении до 10,7 МПа. Но при этом авторы отмечают, что при высоких давлениях результаты сильно отличаются от данных работы [14]. Фазовое поведение бинарной системы диоксид углерода—*цис*-декалин экспериментально изучено в [16] при температуре от 292,75 до 373,75 К и давлении до 49,05 МПа с использованием оптической ячейки переменного объема.

Цель настоящей работы — исследование фазового равновесия бинарной системы *транс*-декалин—диоксид углерода.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы и методы

Органический растворитель *транс*-декалин с чистотой 99,9 % (CAS 91-17-8) поставлен компанией Реал-Сервис (Россия). Диоксид углерода с чистотой 99,0 % приобретен у компании Техгазсервис (Россия).

Принципиальная схема экспериментальной установки, предназначенной для исследования фазового равновесия «жидкость—пар» бинарных систем с использованием оптической ячейки высокого давления, приведена на рис. 1. Установка состоит из системы создания, регулирования и измерения давления, системы измерения и регулирования температуры, сосуда равновесия (оптическая ячейка), системы вакуумирования, узла перемешивания и системы анализа.

Оптическая ячейка (4) с рабочим объемом 117 см³, изготовленная из нержавеющей стали (12X18Н10Т), работает до 50 МПа и 450,15 К и имеет между крышкой и корпусом сапфировые окна. Медная рубашка (5) используется для плавного и равномерного нагрева ячейки, температура которой измеряется термопарой хромель-алюмель (тип К) с точностью 0,15 К. Давление в оптической ячейке определяется образцовым манометром с классом точности 0,15.

Для проведения статического эксперимента оптическую ячейку заполняли на одну треть исследуемым веществом и удаляли воздух вакуумным насосом. Далее ячейку нагревали до требуемой температуры и с помощью насоса высокого давления в нее подавали диоксид углерода до необходимого значения давления. Для достижения равновесия в двухфазной системе в течение 30 мин проводили интенсивное перемешивание содержимого ячейки путем ее вращения вокруг оси на 90° с частотой 8 об/мин. Равновесие в термодинамической системе считается установившимся по достижению неизменной величины давления в системе. Затем оптическую ячейку на 40 мин фиксировали в вертикальном положении.

Анализ проб жидкой и газовой фаз из ячейки проводили гравиметрическим методом. Для отбора проб использовали пробоотборник объемом 4,1 см³.

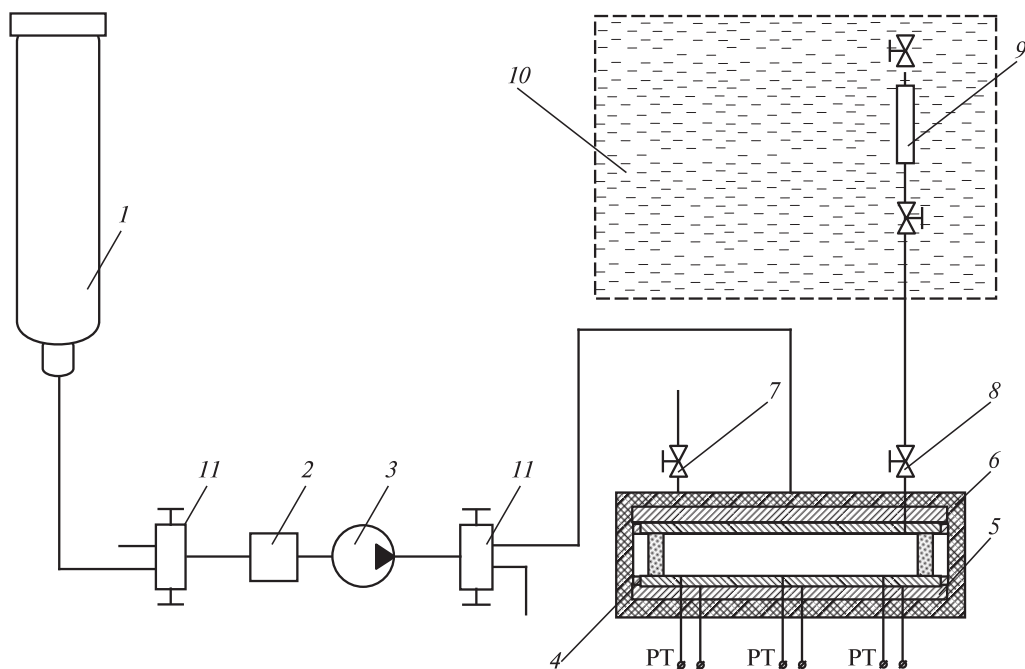


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования фазового равновесия бинарных систем с использованием оптической ячейки высокого давления:

1 — баллон; 2 — фильтр-осушитель; 3 — насос; 4 — оптическая ячейка высокого давления; 5 — медная рубашка; 6 — термоизолирующий материал; 7, 8 — вентили для отбора верхней (газовой) и нижней (жидкой) фаз; 9 — пробоотборник; 10 — термостатирующая ванна; 11 — вентиль

Отбор и анализ проб проводили следующим образом. Первоначально пробоотборник (9) взвешивали на электронных весах марки «Vibra» AF—R220CE с точностью 0,0001 г. Отбор осуществляли соединением пробоотборника и оптической ячейки через шаровой полуоборотный вентиль для быстрого отбора пробы. Разделение отобранной пробы происходит путем охлаждения пробоотборника и медленного удаления CO_2 , при этом для предотвращения уноса растворенного вещества на выходе пробоотборника установлен уловитель.

Поскольку после быстрого отбора проб из любой фазы (жидкости или газа) при заданных условиях эксперимента (P и T) равновесные концентрации в фазах и давление изменяются, следующий отбор проб проводили лишь после перемешивания образца и достижения равновесного состояния при других условиях P и T . Более подробное описание экспериментальной установки и методики приведено в [21, 22].

Для математического моделирования фазового равновесия диоксид углерода—декалин при высоких давлениях фугитивность жидкой и паровой фазы каждой из компонент принимают равной:

$$\mu_i^V(T, P, y_i) = \mu_i^L(T, P, x_i), \quad (1)$$

где μ — фугитивность; T — температура; P — давление; y_i — мольная доля компоненты в паровой фазе; x_i — мольная доля компоненты в жидкой фазе;

индексы: V — паровая фаза; L — жидкая фаза; i — порядковый номер компоненты.

Фугитивность находят с помощью следующих уравнений:

$$\mu_i^V(T, P, y_i) = y_i \phi_i^V P, \quad (2)$$

$$\mu_i^L(T, P, x_i) = x_i \phi_i^L P, \quad (3)$$

где ϕ — коэффициент фугитивности, для нахождения которого использовали уравнение состояния Пенга—Робинсона [23].

Уравнение состояния Пенга—Робинсона имеет вид:

$$P = \frac{RT}{v - b_m} - \frac{a_m}{v^2 + 2vb_m - b_m^2}, \quad (4)$$

где R — универсальная газовая постоянная; a_m и b_m — константы, которые находятся по правилу смешения Ван-дер-Ваальса; v — молярный объем; T — температура;

$$a_m = \sum_i^n \sum_j^n y_i y_j a_{ij}; \quad (5)$$

$$a_{ij} = (1 - k_{ij}) \sqrt{a_i a_j}; \quad (6)$$

$$b_m = \sum_i^n y_i b_i, \quad (7)$$

где k_{ij} — коэффициент бинарного взаимодействия; y_i — мольная доля i -й компоненты.

Константы a_i и b_i находят по формулам:

$$b_i = 0,0778 \frac{RT_{c_i}}{P_{c_i}}, \quad (8)$$

$$a_i = a(T_{c_i}) \alpha(T_r \omega_i), \quad (9)$$

$$a(T_{c_i}) = 0,45724 \frac{R^2 T_{c_i}^2}{P_{c_i}}, \quad (10)$$

$$\alpha(T_r \omega_i) = [1 + \beta_i (1 - T_r^{0,5})], \quad (11)$$

где T_{r_i} — приведенная температура (T/T_{c_i}); T_{c_i} , P_{c_i} — критическая температура и давление i -ой компоненты;

$$\beta_i = 0,3446 + 1,54226 \omega_i - 0,26992 + \omega_i^2, \quad (12)$$

где ω_i — фактор ацентричности i -ой компоненты.

Если ввести следующие обозначения:

$$A = aP/R^2 T^2, \quad B = bP/RT, \quad Z = PV/RT,$$

то уравнение Пенга—Робинсона можно преобразовать в кубическое уравнение относительно Z :

$$Z^3 - (1 - B)Z^2 + (A - 2B - 3B^2)Z - (AB - B^2 - B^3) = 0. \quad (13)$$

Коэффициент фугитивности вещества можно найти, используя следующие уравнения [24]:

$$\ln \phi_i^V = \frac{b_i^*}{b_m} \left(\frac{P_v^V}{RT} - 1 \right) - \ln \left(\frac{P_v^V}{RT} - B \right) - \frac{A}{2,828B} \left(\frac{2 \sum_j x_j a_{ij}}{a_m} - \frac{b_i^*}{b_m} \right) \ln \frac{\frac{P_v^V}{RT} + 2,414B}{\frac{P_v^V}{RT} - 0,414B}, \quad (14)$$

$$\ln \phi_i^L = \frac{b_i^*}{b_m} \left(\frac{P_v^L}{RT} - 1 \right) - \ln \left(\frac{P_v^L}{RT} - B \right) - \frac{A}{2,828B} \left(\frac{2 \sum_j x_j a_{ij}}{a_m} - \frac{b_i^*}{b_m} \right) \ln \frac{\frac{P_v^L}{RT} + 2,414B}{\frac{P_v^L}{RT} - 0,414B}, \quad (15)$$

где $b_i^* = 2 \sum_k x_k b_{ik} - b_{mix}$. (16)

Соответствующий эмпирический параметр бинарного межмолекулярного взаимодействия k_{ij} в уравнении состояния Пенга—Робинсона определяется при фиксированной температуре путем минимизации функции ошибки:

$$F = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y^{\text{расч}} - y^{\text{экс}})^2}{N^{\text{экс}}}} + \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x^{\text{расч}} - x^{\text{экс}})^2}{N^{\text{экс}}}}, \quad (17)$$

где F — функция ошибок, характеризует минимальное отклонение расчета от эксперимента; $N^{\text{экс}}$ — количество экспериментальных точек; индексы: «экс» — экспериментальные данные по фазовому равновесию; «расч» — расчетное значение фазового равновесия по описанной выше методике.

Совместное решение уравнений (1)—(17) позволяет описывать фазовое равновесие в широком диапазоне давлений и температур, в том числе вблизи критической точки чистого растворителя.

Для описания фазового равновесия в системе диоксид углерода—декалин использованы критические параметры [25], представленные в табл. 1.

В связи с отсутствием необходимых литературных данных для *транс*-декалина (T_c , P_c , ω) в работе использованы данные для *цис*-декалина.

Таблица 1

Критические параметры компонентов системы диоксид углерода—декалин

Компонента	P_c , МПа	T_c , К	ω
Диоксид углерода	7,374	304,12	0,225
Декалин	3,2	703,60	0,276

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментального исследования фазового равновесия системы диоксид углерода—декалин представлены на рис. 2 и в табл. 2. Полученные результаты демонстрируют фазовое поведение II типа (по классификации D.F. Williams) [26]. Согласно этой классификации, в случае бинарных систем, относящихся к фазовому поведению I и II типов, характеристики фазового равновесия жидкость—пар по факту представлены лишь бинодалями, в итоге формирующими некую непрерывную критическую кривую между критическими точками индивидуальных компонент. В случае же иного фазового поведения термодинамической системы с прерывной критической кривой между критическими точками индивидуальных компонент (к примеру, IV и V типов) при параметрах, отвечающих СКФ-состоянию растворителя, наблюдается четкая граница раздела фаз.

Таким образом, однофазное сверхкритическое флюидное состояние, которое отвечает методике диспергирования, предполагаемого к осуществлению при $T = 313$ К, имеет место при значениях давления, превышающих 12,4 МПа; при $T = 333$ К это состояние существует при значениях давления, превышающих 15,3 МПа.

Неопределенность результатов исследования фазового равновесия для рассмотренных выше систем оценивается как (2,1—5,8) %.

Полученные экспериментальные данные описаны с использованием уравнения состояния Пенга—Робинсона.

В результате расчетов найдены параметры бинарного взаимодействия системы диоксид углерода—декалин для изотерм: 313 К — 0,1; 333 К — 0,105 (рис. 3).

В целом, точность описания в области критической точки и паровой ветви сопоставима с неопределенностью экспериментального исследования. Однако, описание жидкой фазы незначительно выходит за пределы неопределенности экспериментальных данных.

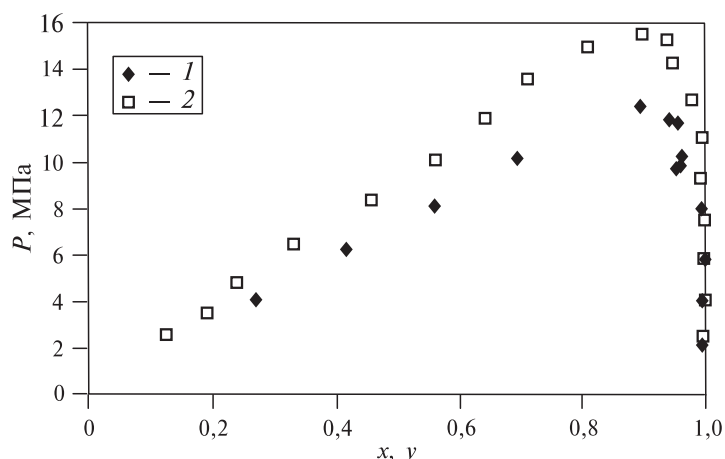


Рис. 2. Фазовая диаграмма для системы диоксид углерода—декалин при разных температурах, К: 1—313; 2—333:

x — мольная фракция CO_2 в жидкой фазе (левая ветвь); y — мольная фракция CO_2 в паровой фазе (правая ветвь)

Таблица 2

Экспериментальные данные по фазовому равновесию системы диоксид углерода—декалин

Давление, МПа	СО ₂ , мольн. доля	Декалин, мольн. доля
313,15 К		
Жидкая фаза		
2,32	0,149	0,851
4,09	0,270	0,730
6,26	0,418	0,582
8,13	0,562	0,438
10,19	0,693	0,307
12,41	0,893	0,107
Паровая фаза		
2,15	0,995	0,005
4,03	0,995	0,005
5,89	0,999	0,001
7,99	0,992	0,008
9,84	0,959	0,041
10,26	0,961	0,039
11,73	0,955	0,045
11,86	0,942	0,058
333,15 К		
Жидкая фаза		
2,54	0,127	0,873
3,50	0,192	0,808
4,76	0,239	0,761
6,45	0,331	0,669
8,39	0,458	0,542
10,06	0,561	0,439
11,90	0,643	0,357
13,64	0,711	0,289
14,96	0,809	0,191
15,50	0,896	0,104
Паровая фаза		
2,52	0,997	0,003
4,08	0,999	0,001
5,83	0,999	0,001
7,52	0,999	0,001
9,35	0,991	0,009
11,06	0,994	0,006
12,67	0,977	0,023
14,26	0,948	0,052
15,32	0,937	0,063

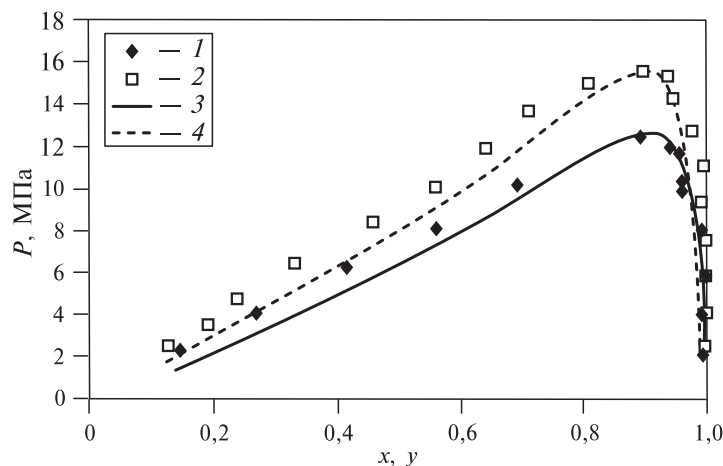


Рис. 3. Фазовая диаграмма для системы диоксид углерода—декалин при разных температурах, К:

1, 3 — 313; 2, 4 — 333. (◆, □) — экспериментальные точки; (—, ---) — расчетные кривые

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе экспериментально исследовано фазовое равновесие бинарной системы декалин—диоксид углерода. Установлено, что данная система относится к фазовому поведению II типа, для которой характерна общая критическая точка. Результаты экспериментального исследования описаны с использованием уравнения состояния Пенга—Робинсона. Показано, что точность описания в области критической точки и паровой ветви сопоставима с неопределенностью экспериментального исследования фазового равновесия системы декалин—диоксид углерода.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-73-10029, <https://rscf.ru/project/19-73-10029/>

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mukhopadhyay M. // Natural Extracts Using Supercritical Carbon Dioxide. CRC Press, Boca Raton, 2000.
2. Гумеров Ф.М., Хайрутдинов В.Ф., Ахметзянов Т.Р., Габитов Ф.Р., Зарипов З.И., Фарухов М.И., Мухутдинов А.В. // Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика. 2016. Т. 11. № 2. С. 75.
3. Боголицын К.Г., Гусакова М.А., Красикова А.А., Ивахнов А.Д., Хвиюзов С.С., Чухчин Д.Г., Зубов И.Н. // Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика. 2016. Т. 11 № 2. С. 53.
4. Соловьева А.Б., Шеринев И.В. // Вестник РФФИ. 2017. № 1. С. 19.
5. Gumerov F.M., Akhmetzyanov T.R., Gabitov F.R., Farakhov M.I., Khayrutdinov V.F., Kameneva E.E. // Petroleum Science and Technology. 2017. Vol. 35. No 2. P. 163.
6. Тараева А.Ю., Герасимова В.И., Заворотный Ю.С., Рыбалтовский А.О., Баграташвили В.Н. // Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика. 2008. Т. 3. № 1. С. 59.

7. Kikic I., Vecchione F. // *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.* 2003. No 7. P. 399.
 8. Леменовский Д.А., Баграташвили В.Н. // *Соровский образовательный журнал.* 1999. № 10. С. 36.
 9. Knez Z., Leitgeb M., Primožič M. // *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology.* New York : Springer, 2018. P. 1.
 10. Menshutina N.V., Katalevich A.M., Smirnova I.V. // *Rus. J. Phys. Chem. B.* 2014. Vol. 8. No 7. P. 973.
 11. Khabriev I.Sh., Khairutdinov V.F., Gumerov F.M., Khuzakhanov R.M., Garipov R.M., Abdulagatov I.M. // *J. Molecular Liquids.* 2021. Vol. 337. P. 116371.
 12. Yeo S.D., Kiran E. // *J. Supercrit. Fluids.* 2005. Vol. 34. P. 287.
 13. Воробей А.М., Покровский О.И., Устинович К.Б., Паренаго О.О., Лукин В.В., Мирошниченко А.Г. // *Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика.* 2018. Т. 13. № 1. С. 64.
 14. David L. Tiffin, Antonio L. DeVera, Kraemer D. Luks, James P. Kohn. // *J. Chem. Eng. Data.* Vol. 23. No 1. 1978. P. 45.
 15. Anderson J., Barrick M.W., Robinson R.L. // *J. Chem. Eng. Data.* 1986. Vol. 31. P. 172.
 16. Vitu S., Jaubert J.N., Pauly J., Daridon J.L. // *J. Chem. Thermodynamics.* 2008. Vol. 40. P. 1358.
 17. Leder F., Irani C.A. // *J. Chem. Eng. Data.* 1975. Vol. 20. No 3. P. 323.
 18. Darwish N.A., Gaseem K.A.M., Robinson R.L. // *J. Chem. Eng. Data.* 1998. Vol. 43. No 2. P. 238.
 19. Tobaly P., Marteau P., Meray V.R. // *J. Chem. Eng. Data.* 2001. Vol. 46. No 5. P. 1269.
 20. Tobaly P., Marteau P., Meray V.R. // *J. Chem. Eng. Data.* 2004. Vol. 49. No 4. P. 795.
 21. Khairutdinov V.F., Gumerov F.M., Gabitov F.R., Zaripov Z.I., Khabriev I.S., Akhmetzyanov T.R., Abdulagatov I.M. // *J. Chem. Eng. Data.* 2020. Vol. 65. No 7. P. 3306.
 22. Khairutdinov V.F., Khabriev I.S., Akhmetzyanov T.R., Gumerov F.M., Salikhov I.Z., Abdulagatov I.M. // *J. Molecular Liquids.* 2021. Vol. 342. Is.117541.
 23. Robinson D.B., Peng D.Y. // *The characterization of the heptanes and hea Vier fractions for the GPA Peng—Robinson programs.* Research Report RR-28. 1978.
 24. McHugh M.A., Krukoniš V. // *J. Supercritical fluid extraction. Principles and Practice.* 2nd edition. Butterworth-Heinemann, 1994.
 25. Vitu S., Jaubert J.N., Pauly J., Daridon J.L., Barth D. // *J. Chem. Eng. Data.* 2007. Vol. 52. No 5. P. 1851.
 26. Williams D.F. // *J. Chem. Eng. Science.* 1981. Vol. 36. No 11. P. 1769.
-
-

PHASE EQUILIBRIUM OF THE BINARY SYSTEM «DECALIN—CARBON DIOXIDE»

I.Sh. Khabriev — Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.
ORCID: 0000-0002-0327-0343. E-mail: termi0@yandex.ru

I.M. Gilmutdinov — Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.
ORCID: 0000-0003-4241-6306. E-mail: gilfar1982@gmail.com

L.Yu. Yarullin — Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.
ORCID: 0000-0003-1371-6721. E-mail: yarul.lenar@gmail.com

V.F. Khairutdinov — Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.
ORCID: 0000-0002-8137-6450. E-mail: kvener@yandex.ru (*for correspondence*)

F.M. Gumerov — Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.
ORCID: 0000-0002-3806-2165. E-mail: gum@kstu.ru

The results of an experimental study of the phase equilibrium of the binary system «decalin— carbon dioxide» carried out on isotherms of 313 and 333 K and in the pressure range of 2—15 MPa using a high-pressure optical cell are presented. I—II type of phase behavior has been established. The experimental results are described using the Peng—Robinson equation of state.

Key words: decalin, carbon dioxide, phase equilibrium, solubility, thermodynamic model, Peng—Robinson equation.

ALKNOWLEDGEMENTS

The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No 19-73-10029, <https://rscf.ru/en/project/19-73-10029/>

The present study was carried out using the equipment of the Center for Collective use «Nanomaterials and Nanotechnology» of the Kazan National Research Technological University.

REFERENCES

1. *Mukhopadhyay M.* // Natural Extracts Using Supercritical Carbon Dioxide. CRC Press, Boca Raton, 2000.
2. *Gumerov F.M., Khairutdinov V.F., Akhmetzyanov T.R., Gabitov F.R., Zaripov Z.I., Farakhov M.I., Mukhutdinov A.V.* // Rus. J. Phys. Chem. B. 2017. Vol. 11. P. 1103..
3. *Bogolitsyn K.G., Gusakova M.A., Krasikova A.A., Ivakhnov A.D., Khviuzov S.S., Chukhchin D.G., Zubov I.N.* // Rus. J. Phys. Chem. B. 2017. Vol. 11. No 7. P. 1089.
4. *Solovieva A.B., Shershnev I.V.* // RFBR Bulletin. 2017. No 1. P. 19.
5. *Gumerov F.M., Akhmetzyanov T.R., Gabitov F.R., Farakhov M.I., Khayrutdinov V.F., Kameneva E.E.* // Petroleum Science and Technology. 2017. Vol. 35. No 2. P. 163.
6. *Taraeva A.Yu., Gerasimova V.I., Zavorotny Yu.S., Rybaltovsky A.O., Bagratashvili V.N.* // Sverkhkritischeskiye Flyuidy: Teoriya i Praktika. 2008. Vol. 3. No 1. P. 66.
7. *Kikic I., Vecchione F.* // Curr. Opinion Solid State Mate. Sci. 2003. 2003. No 7. P. 3997.
8. *Lemenovsky D.A., Bagratashvili V.N.* // Sorovskij obrazovatel'nyj zhurnal. 1999. № 10. P. 36.
9. *Knez Z., Leitgeb M., Primožic M.* // Encyclopedia of Sustainability Science and Technology. New York : Springer. 2018. P. 1.
10. *Menshutina N.V., Katalovich A.M., Smirnova I.V.* // Rus. J. Phys. Chem. B. 2014. Vol. 8. No 7. P. 973.
11. *Khabriev I.Sh., Khairutdinov V.F., Gumerov F.M., Khuzakhanov R.M., Gariyov R.M., Abdulagatov I.M.* // J. Molecular Liquids. 2021. Vol. 337. Is. 16371.
12. *Yeo S.D., Erdogan Kiran E.* // J. Supercrit. Fluids. 2005. Vol. 34. P. 287.
13. *Vorobei A.M., Pokrovskiy O.I., Ustinovich K.B., Parenago O.O., Lunin V.V., Miroshnichenko A.G.* // Russ. J. Phys. Chem. B. 2018. Vol. 12. P. 1240.
14. *David L. Tiffin, Antonio L. DeVera, Kraemer D. Luks, James P. Kohn.* // J. Chem. Eng. Data. Vol. 23. No 1. 1978. P. 45.
15. *Anderson J., Barrick M.W., Robinson R.L.* // J. Chem. Eng. Data. 1986. 31. P. 172.
16. *Vitu S., Jaubert J.N., Pauly J., Daridon J.L.* // J. Chem. Thermodynamics. 2008. Vol. 40. P. 1358.
17. *Leder F., Irani C.A.* // J. Chem. Eng. Data. 1975. Vol. 20. No 3. P. 323.
18. *Darwish N.A., Gasem K.A.M., Robinson R.L.* // J. Chem. Eng. Data. 1998. Vol. 43. No 2. P. 238.
19. *Tobaly P., Marteau P., Meray V.R.* // J. Chem. Eng. Data. 2001. Vol. 46. No 5. P. 1269.
20. *Tobaly P., Marteau P., Meray V.R.* // J. Chem. Eng. Data. 2004. Vol. 49. No 4. P. 795.
21. *Khairutdinov V.F., Gumerov F.M., Gabitov F.R., Zaripov Z.I., Khabriev I.S., Akhmetzyanov T.R., Abdulagatov I.M.* // J. Chem. Eng. Data. 2020. Vol. 65. No 7. P. 3306.
22. *Khairutdinov V.F., Khabriev I.S., Akhmetzyanov T.R., Gumerov F.M., Salikhov I.Z., Abdulagatov I.M.* // J. Molecular Liquids. 2021. Vol. 342. Is.117541.
23. *Robinson D.B., Peng D.Y.* // The characterization of the heptanes and hea Vier fractions for the GPA Peng—Robinson programs. Research Report RR-28. 1978.
24. *McHugh M.A., Krukonis V.* // J. Supercritical fluid extraction. Principles and Practice. 2nd edition. Butterworth-Heinemann. 1994.
25. *Vitu S., Jaubert J.N., Pauly J., Daridon J.L., Barth D.* // J. Chem. Eng. Data. 2007. Vol. 52. No 5. P. 1851.
26. *Williams D.F.* // J. Chem. Eng. Science. 1981. V. 36. No 11. P. 1769.