

ФАЗОВОЕ РАВНОВЕСИЕ БИНАРНОЙ СИСТЕМЫ «ВОДА—ПРОПАН/БУТАН»

Т.Р. Биалов — Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия; Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ. ORCID: ID0000-0001-6970-471. Эл. почта: t.bilalov@yandex.ru (для переписки)

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

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

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 29.11.2021 г. Прошла рецензирование 15.12.2021 г.
Принята к публикации 15.12.2021 г.

С использованием оптической ячейки высокого давления в интервале температуры 403—443 К и давления 5,28—20,66 МПа исследовано фазовое равновесие системы «вода—пропан/бутан» и установлен V тип фазового поведения. Растворимость воды в сверхкритической (СК) пропан/бутановой смеси в указанных условиях оценена на основе характеристик паровой ветви фазового равновесия системы «вода—пропан/бутан» и описана с использованием уравнения состояния Пенга—Робинсона в сочетании с правилом комбинирования Мухопадхья и Рао.

Ключевые слова: вода, сверхкритическая пропан/бутановая смесь, фазовое равновесие, растворимость, термодинамическая модель, уравнение Пенга—Робинсона.

ВВЕДЕНИЕ

Процессы сверхкритической флюидной экстракции (СКФЭ) с целью выделения и очистки, а также разделения и фракционирования, основанные на способности СКФ-сред к селективному извлечению некоторых веществ или их групп в соответствующих термодинамических условиях, достаточно хорошо известны. Так, например, опубликованы работы, посвященные СКФЭ-переработке нефтяных шламов [1], выделению углеводов из нефтеносных песков [2] и из водонефтяных эмульсий [3, 4]. При выделении углеводов из нефтяных отходов в ходе процесса СКФЭ вода в той или иной степени также извлекается экстрагентом и попадает в состав нефтепродукта (экстракта). Для достижения максимального обезвоживания конечного нефтепродукта повышение эффективности экстракции в значительной мере определяется степенью изучения характеристик фазового равновесия системы «вода—экстрагент», количественные значения которых зависят от режимных параметров осуществления процесса.

СКФ-технологии в целом и процессы экстракции в частности в подавляющем большинстве случаев реализованы с использованием в качестве экстрагента диоксида углерода, преимущество которого определяется, прежде всего, возможностью проведения процесса СКФ-экстракции в умеренных термодинамических условиях (CO_2 : $T_{\text{кр}} = 304,14$ К, $P_{\text{кр}} = 7,38$ МПа; H_2O : $T_{\text{кр}} = 647,1$ К, $P_{\text{кр}} = 22,06$ МПа). Однако, диоксид углерода не лишен и некоторых недостатков, например, ввиду своей неполярности он способен экстрагировать, как правило, лишь неполярные соединения.

В литературе имеется целый ряд статей по изучению растворимости воды в СК- CO_2 [5—14]. Исследования в этих работах в целом проведены при давлениях до 100 МПа и температурах до 1000 К. Установлено [10], что фазовое поведение системы «вода— CO_2 » относится к фазовому поведению III типа по классификации Скотта и Кониненбурга [15] или к V типу по классификации Уильямса [16]. Результаты исследований фазовых равновесий бинарных систем «вода—легкий углеводород (метан, этан, пропан, бутан)» приведены в работах [17—25]. Фазовые диаграммы этих систем также отвечают V типу поведения по классификации [16].

Перспективными растворителями для нефтехимической промышленности являются *n*-алканы, в том числе пропан, бутан и их смеси. Одним из немаловажных преимуществ этих углеводородов являются относительно низкие значения критических параметров, особенно давления. Эти параметры для пропана и бутана, согласно [26—27], характеризуются следующими значениями: пропан — $T_{\text{кр}} = 369,82$ К ($96,67$ °С), $P_{\text{кр}} = 4,247$ МПа; бутан — $T_{\text{кр}} = 425$ К ($151,85$ °С), $P_{\text{кр}} = 3,797$ МПа.

Доступность и относительная дешевизна пропан/бутановой смеси, а также полное отсутствие информации по фазовому равновесию системы «вода—пропан/бутановая смесь» или по растворимости воды в СК пропан/бутановой смеси послужили основанием для проведения настоящего исследования.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы и методы

В работе использовали пропан/бутановую смесь в соотношении (мас. %): 45,8 : 54,2 и критическими параметрами: $T_{\text{кр}} = 394,25$ К ($121,1$ °С), $P_{\text{кр}} = 4,3$ МПа, а также дистиллированную воду.

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, системы вакуумирования, узла качания и аналитической части.

Для проведения статического эксперимента оптическую ячейку заполняли на одну треть исследуемым веществом и систему вакуумировали. Далее ячейку нагревали до заданной температуры, насосом высокого давления в нее подавали пропан/бутановую смесь до необходимого давления и интенсивно перемешивали для достижения равновесия в двухфазной системе. Переход в это состояние контролировали опытами с отбором проб на анализ и/или по изменению давления в оптической ячейке. Более

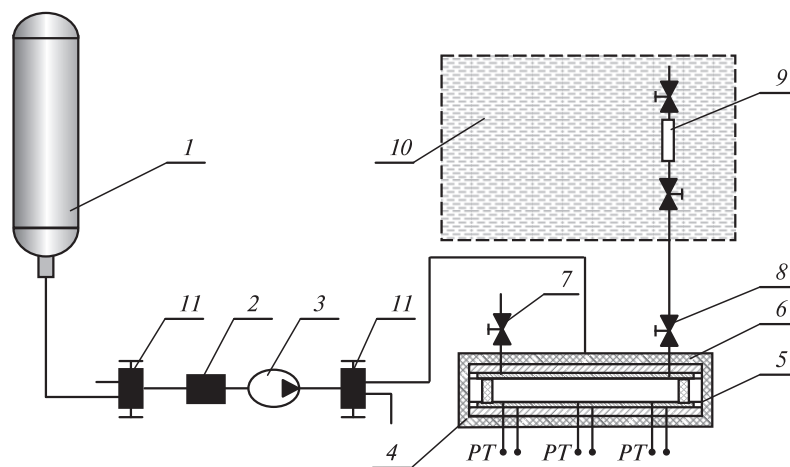


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования фазового равновесия бинарных систем с использованием оптической ячейки высокого давления:

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

подробное описание экспериментальной установки и методики приведено в работах [28, 29].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследования фазового равновесия системы «вода—пропан/бутан» (рис. 2) установлена ее принадлежность к фазовому поведению V типа

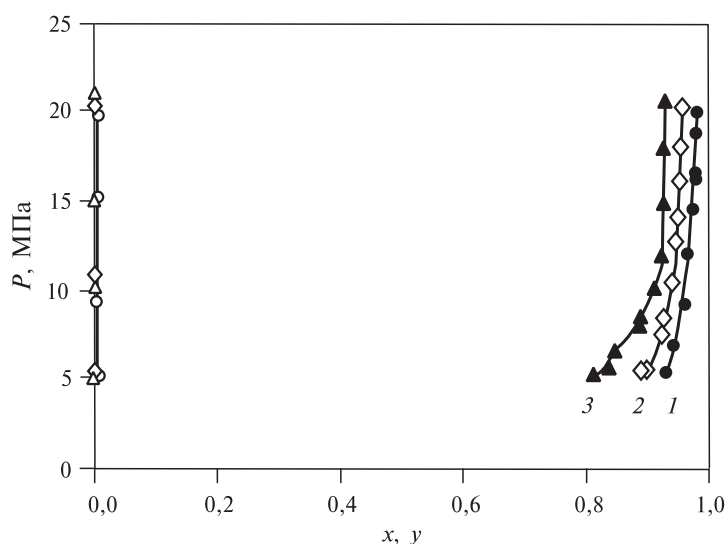


Рис. 2. Фазовое равновесие бинарной системы «вода—пропан/бутан»:

x — мольная фракция пропан/бутана в жидкой фазе (левая ветвь); y — мольная фракция пропан/бутана в паровой фазе (правая ветвь) при различных температурах, К:

1 — 403; 2 — 423; 3 — 443

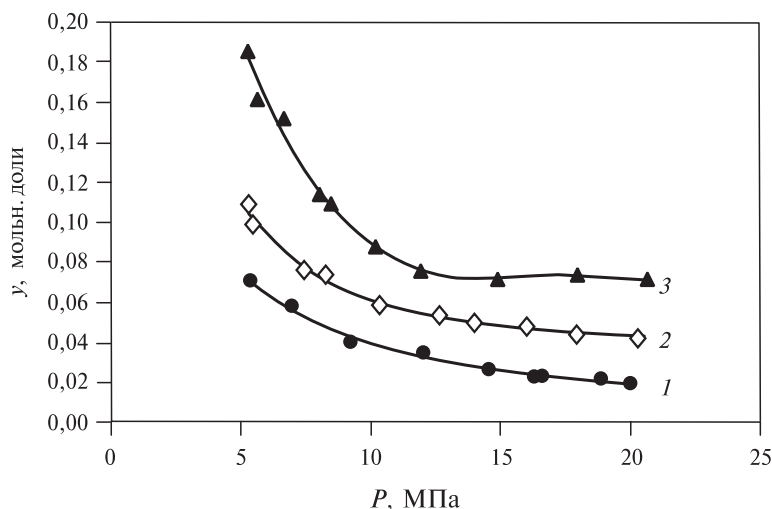


Рис. 3. Растворимость воды в СК пропан/бутановой смеси состава (мас. %) 45,8/54,2 при различных температурах, К:
1 — 403; 2 — 423; 3 — 443

(по классификации Уильямса) [16]. Неопределенность результатов изучения фазового равновесия для рассмотренных выше систем оценивается как 2,1—5,8 %.

В этом случае в области СК-параметров пропан/бутановой смеси для системы «вода—пропан/бутан» сохраняется граница раздела фаз «жидкость—пар», и существует методическая возможность определения растворимости воды в СК—пропан/бутане, оценка которой на основе характеристик паровой ветви фазового равновесия приведена на рис. 3.

Результаты исследования фазовой диаграммы «вода—пропан-бутан» описаны в соответствии с моделью, широко апробированной в работе [30] и позволяющей исследовать растворимость низколетучих и несжимаемых веществ в чистых и модифицированных СКФ-средах:

$$y = \frac{P_v^i}{P\Phi_i} \exp \left[\frac{v}{RT(P - P_v^i)} \right]$$

или

$$\ln(y) = \ln \left(\frac{P_v^i}{P} \right) - \ln(\Phi) + \frac{Pv_i}{RT},$$

где y — растворимость вещества в СКФ-растворителе, мольные доли; P_v — давление насыщенных паров растворяемого вещества при температуре T ; P — давление в системе; Φ — коэффициент летучести растворяемого вещества во флюиде; v_i — мольный объем чистого растворяемого вещества; R — универсальная газовая постоянная.

Коэффициент летучести растворяемого вещества во флюидной фазе может быть вычислен с помощью одного из кубических многопараметрических уравнений состояния. В работе было использовано двухпараметрическое урав-

нение состояния Пенга—Робинсона, широко применяемое для расчета фазовых равновесий в системах «вещество—СКФ»:

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V+b) + b(V-b)},$$

где V — удельный объем; a и b — параметры уравнения Пенга—Робинсона, которые для чистых компонентов являются комбинациями критических давлений и температур:

$$a_i = 0,45724R^2 T_{кр}^2 \alpha_i(T)/P_{кр}; \quad b_i = 0,0778RT_{кр}/P_{кр};$$

$$a_i(T) = [1 + (0,37464 + 1,54226\omega_i - 0,26992\omega_i^2)(1 - (T/T_{кр})^{1/2})]^2,$$

где $P_{кр}$, $T_{кр}$, и ω_i — критическое давление, критическая температура и фактор ацентричности i -го компонента.

Для смеси эти параметры определяются в соответствии с принятым законом смешивания и правилом комбинирования Мухопадхьяи и Рао [30]:

$$a = \sum_i \sum_j y_i y_j a_{ij} \left(\frac{b}{b_{ij}} \right)^{m_{ij}}, \quad b = \sum_i y_i b_i, \quad a_{ij} = \sqrt{a_i a_j}, \quad b_{ij} = \sqrt{b_i b_j},$$

где y_i и y_j — мольные доли соответственно i -го и j -го компонентов смеси в любой из равновесных фаз, m_{ij} — эмпирический коэффициент бинарного взаимодействия, учитывающий особенности парного взаимодействия разнородных молекул; определяется в рамках правила комбинирования Мухопадхьяи и Рао [30].

В ходе расчетов задается начальное значение коэффициента бинарного взаимодействия $m_{ij} = 0,01$ и для каждого значения P , T и y по ранее представленным формулам рассчитываются значения величин a и b , затем рассчитывается коэффициент летучести исследуемого вещества во флюиде:

$$\ln(\Phi_2) = (z-1)B_1 = \ln(z-B) = \frac{a}{2\sqrt{2}RTb} (A_1 + A_2 - B_1) \ln \left(\frac{z+2,14B}{z+0,414B} \right),$$

где

$$B_1 = \frac{b_i}{b}, \quad A_1 = \frac{2}{a} \sum_i y_i a_{i2} \left(\frac{b}{b_{i2}} \right)^{m_{i2}}, \quad A_2 = \frac{1}{a(B_1-1) \sum_i \sum_j y_i y_j a_{ij} m_{ij} \left(\frac{b}{b_{ij}} \right)^{m_{ij}}}.$$

В случае бинарной системы (СК-растворитель—растворяемое вещество) коэффициенты i и j принимают значения 1 или 2, а в случае трехкомпонентной системы (СК-растворитель—соразтворитель—растворяемое вещество) коэффициенты i и j принимают значения 1, 2 или 3.

После определения коэффициента летучести растворенного вещества проводится расчет растворимости при выбранном значении коэффициента бинарного взаимодействия. Затем берется следующее значение коэффициента бинарного взаимодействия и расчет повторяется сначала.

Итоговое значение коэффициента бинарного взаимодействия m_{ij} определяется для каждой изотермы путем минимизации среднеквадратичного отклонения расчетных данных от экспериментальных точек:

$$F = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i^{\text{расч}} - y_i^{\text{эксп}}}{y_i^{\text{расч}}} \right)^2},$$

где n — количество экспериментальных точек на изотерме.

В дополнение к коэффициенту бинарного взаимодействия, в качестве подгоночного параметра использовали давление насыщенных паров растворяемого вещества. Это позволило существенно повысить точность описания растворимости для случаев, когда экспериментальное значение давления насыщенных паров на исследуемой изотерме неизвестно. Целесообразность такого решения была обоснована ранее в работах [31, 32].

Описание растворимости воды в пропан/бутановой смеси проводили, исходя из трех различных предположений, касающихся пропан/бутановой смеси. Согласно первому предположению, пропан/бутановую смесь рассматривали как единое вещество. В рамках второго предположения пропан рассматривали как основной растворитель, а бутан как соразтворитель. В соответствии с третьим предположением бутан рассматривали как основной растворитель, а пропан как соразтворитель. Таким образом, мы получили одну двухкомпонентную и две трехкомпонентные системы. Из описания была исключена изотерма 403 К, поскольку она соответствует критической температуре пропан/бутановой смеси, а модель дает большую погрешность при описании растворимости на критической изотерме. Результаты представлены на рис. 4

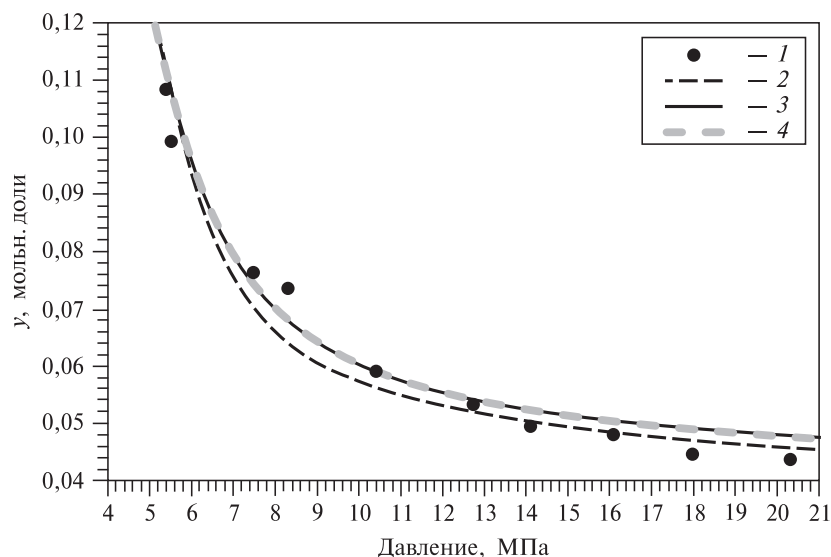


Рис. 4. Растворимость воды в СК пропан/бутановой смеси на изотерме 423 К:

1 — экспериментальные точки; описание растворимости для различных условий: 2 — растворитель — пропан/бутановая смесь; 3 — пропан — растворитель, бутан — соразтворитель; 4 — бутан — растворитель, пропан — соразтворитель

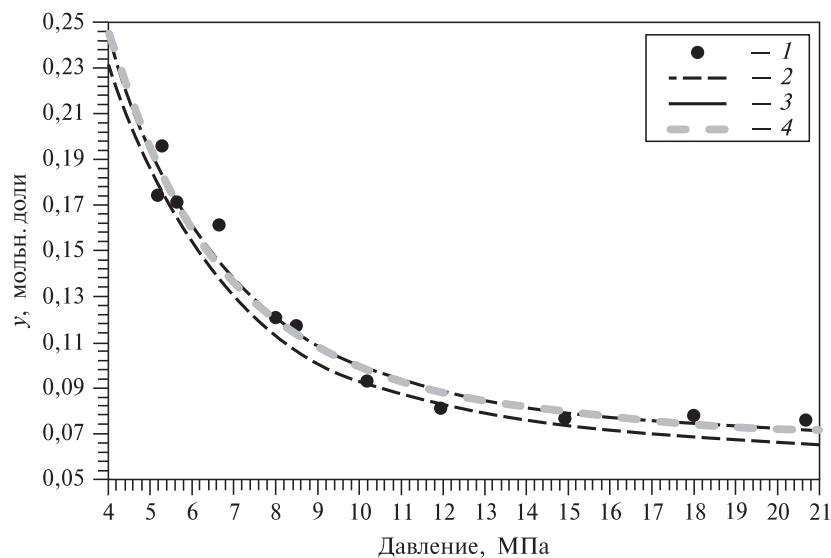


Рис. 5. Растворимость воды в СК пропан/бутановой смеси на изотерме 443 К:

1 — экспериментальные точки; описание растворимости для различных условий: 2 — растворитель — пропан/бутановая смесь; 3 — пропан — растворитель, бутан — соразтворитель; 4 — бутан — растворитель, пропан — соразтворитель

и 5. В первую очередь, следует отметить, что результаты описания, полученные исходя из второго и третьего предположений (пропан как основной растворитель, бутан как соразтворитель, и наоборот), полностью совпадают между собой, а точность описания отличается друг от друга менее, чем на 0,02 % (таблица). При этом коэффициенты бинарного взаимодействия существенно отличаются друг от друга, особенно коэффициент, отвечающий за взаимодействие соразтворителя и растворяемого вещества.

Таблица

Результаты описания растворимости воды в пропан/бутановой смеси

423 К			
Итоговые значения коэффициентов m_{ij}	m_{12}	m_{13}	Неопределенность описания, %
Пропан — растворитель, бутан — соразтворитель	0,56	-4,92	5,078
Бутан — растворитель, пропан — соразтворитель	-0,03	-1,72	5,079
Растворитель — пропан/бутановая смесь	-0,73	—	6,16
443 К			
Итоговые значения коэффициентов m_{ij}	m_{12}	m_{13}	Неопределенность описания, %
Пропан — растворитель, бутан — соразтворитель	0,33	-16,97	5,908
Бутан — растворитель, пропан — соразтворитель	0,08	-13,29	5,926
Растворитель — пропан-бутановая смесь	-1,28	—	5,788

В целом точность описания сопоставима с неопределенностью экспериментального исследования, что позволяет сделать вывод о корректности полученных результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе экспериментально исследовано фазовое равновесие бинарной системы «вода—пропан/бутан». Установлено, что эта система относится к фазовому поведению V типа, для которой характерен разрыв критической линии раствора. Проведен расчет растворимости воды в СК пропан/бутановой смеси на основе параметров паровой ветви фазового равновесия обсуждаемой бинарной системы. Результаты оценки растворимости описаны с использованием уравнения состояния Пенга—Робинсона. Показано, что точность описания сопоставима с неопределенностью экспериментального исследования фазового равновесия системы «вода—пропан/бутан».

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках финансовой поддержки в виде гранта Российского научного фонда (проект № 19-73-10029)».

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гумеров Ф.М., Хайрутдинов В.Ф., Ахметзянов Т.Р., Габитов Ф.Р., Зарипов З.И., Фарахов М.И., Мухутдинов А.В. // Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика. 2016. Т. 11. № 2. С. 75.
2. Хайрутдинов В.Ф., Ахметзянов Т.Р., Гумеров Ф.М., Хабриев И.Ш., Фарахов М.И. // Теоретические основы химической технологии. 2017. Т. 51. № 3. С. 288.
3. Хайрутдинов В.Ф., Габитова А.Р., Гумеров Ф.М., Габитов Ф.Р., Курдюков А.И. // Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика. 2018. Т. 13. № 3. С. 97.
4. *Khairutdinov V.F., Gumerov F.M., Zariyov Z.I., Akhmetzyanov T.R., Farakhov M.I., Truong H.N.* // Petr. Sci. Techn. 2019. Vol. 37. No 3. P. 290.
5. *Намиот А.Ю.* Фазовые равновесия в добыче нефти. М. Недра, 1976. 183 с
6. *Sabirzyanov A.N., Shagiakhmetov R.A., Gabitov F.R., Tarzimanov A.A., Gumerov F.M.* // Theor. Found. of Chem. Eng. 2003. Vol. 37. No 1. P. 51.
7. *Mather A. E., Franck E.U.* // J. Phys. Chem. 1992. No 96. P. 6.
8. *Сабирзянов А.Н., Ильин А.П., Ахунов А., Гумеров Ф.М.* // Теплофизика высоких температур. 2002. № 2. С. 231.
9. *King M.B., Mubarak A., Kim J.D., Bott T.R.* // J. Supercrit. Fluids. 1992. Vol. 5. P. 296.
10. *Nino-Amézquita G., Van Puttenb D., Enders S.* // Fluid Phase Equilibria. 2012. Vol. 332. P. 40.
11. *Shyu G.S., Nishawn S.M. Hanif, Hall K.R., Eubank P.T.* // Fluid Phase Equilibria. 1997. Vol. 130. P. 73.
12. *Wiebe R.* // Chemical Reviews. 1941. Vol. 29(3). P. 475.
13. *Briones J.A., Mullins J.C., Thies M.C., Kim B.U.* // Fluid Phase Equilibria. 1987. Vol. 36. P. 235.
14. *Song K.Y., Kobayashi R.* // SPE Formation Evaluation. 1987. Vol. 2(04). P. 500.
15. *Konynenburg H.V., Scott R.L.* // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1980. Vol. 298(1442). P. 495.
16. *Williams D.F.* // J. Chem. Eng. Science. 1981. Vol. 36. No 11. P. 1769.
17. *Olds R.H., Sage B.H., Lacey W.N.* // Ind. Eng. Chem. Res. 1942. Vol. 34. No 10. P. 1223.
18. *Mohammadi A.H., Chapoy A., Richon D., Tohidi B.* // Ind. Eng. Chem. Res. 2004. Vol. 43(22). P. 7148.

19. Böttger A., Kamps A., Maurer G. // Fluid Phase Equil. 2016. No 407. P. 209.
20. Song K.Y., Kobayashi R. // Fluid Phase Equilibria. 1994. No 95. P. 281.
21. Yang S.O., Cho S.H., Lee H., Lee C.S. // Fluid Phase Equilibria. 2001. Vol. 185. No 1–2. P. 53.
22. Brooks W.B., Gibbs G.B., McKetta J. Jr. // Petrol. Refiner. 1951. Vol. 30 (10). P. 118.
23. Oliveira M.B., Coutinho J.A.P., Queimada A.J. // Fluid Phase Equil. 2007. Vol. 258. P. 58.
24. Tabasinejad F., Moore G.R., Mehta S.A., Van Fraassen K.C., Barzin Y. // Ind. Eng. Chem. Res. 2011. Vol. 50. P. 4029.
25. Kobayashi R., Katz D. // Ind. Eng. Chem. Res. 1953. Vol. 45(2). P. 440.
26. Juntarachat N. // J. Chem. Eng. Data. 2013. Vol. 58. P. 671.
27. Beranek P. // Fluid Phase Equilibria. 1981. Vol. 6. P. 279.
28. Khairutdinov V.F., Gumerov F.M., Zariпов Z.I., Khabriev I.Sh., Yarullin L.Yu., Abdulagatov I.M. // J. Supercrit. Fluids. 2020. Vol. 156. P. 104628.
29. Khairutdinov V.F., Gumerov F.M., Khabriev I.Sh., Farakhov M.I., Salikhov I.Z., Polishuk I., Abdulagatov I.M. // Fluid Phase Equilibria. 2020. Vol. 510. P. 112502
30. Mukhopadhyay M., Rao G.V.R. // Ind. Eng. Chem. Res. 1993. Vol. 32. P. 922.
31. Bilalov T.R., Gumerov F.M., Le Neindre B. Description and generalization of solubility in supercritical fluids. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG. Dudweiler Landstr. 99, 66123 Saarbrücken, Germany. 2018, 113 p.
32. Билалов Т.Р., Гумеров Ф.М. // Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика. 2019. Т. 14. № 2. С. 40.

PHASE EQUILIBRIUM OF THE BINARY SYSTEM «WATER—PROPANE/BUTANE»

T.R. Bilalov — Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia;
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI.
ORCID: ID0000-0001-6970-471. E-mail: t.bilalov@yandex.ru (*for reference*)

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

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

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 «water—propane/butane» system carried out in the temperature range of 403–443 K and the pressure range of 5.28–20.66 MPa using a high-pressure optical cell are presented. The V type of phase behavior is established. The solubility of water in a supercritical propane-butane mixture under the above mentioned thermodynamic conditions is estimated based on the characteristics of the steam branch of the phase equilibrium of the «water—propane/butane» system and described using the Peng—Robinson equation of state in combination with the Mukhopadhyay and Rao mixing rule was made.

Keywords: water, supercritical propane/butane mixture, phase equilibrium, solubility, thermodynamic model, Peng—Robinson equation of state.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Russian Scientific Found, Project number 19-73-10029.

The 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. Gumerov F.M., Khairutdinov V.F., Akhmetzyanov T.R., Gabitov F.R., Zaripov Z.I., Farakhov M.I., Mukhutdinov A.V. // Russ. J. Phys. Chem. B. 2017. Vol. 11. P. 1103.
2. Khairutdinov V.F., Akhmetzyanov T.R., Gumerov F.M., Khabriev I.S., Farakhov M.I. // Theor. Found. Chem. Eng. 2017. Vol. 51. No 3. P. 299.
3. Khayrutdinov V.F., Gabitova A.R., Gumerov F.M., Gabitov R.F., Kurdyukov A.I. / Russ. J. Phys. Chem. B. 2019. Vol. 13. P. 1128.
4. Khairutdinov V.F., Gumerov F.M., Zaripov Z.I., Akhmetzyanov T.R., Farakhov M.I., Truong H.N. // Pet. Sci. Technol. 2019. Vol. 37. No 3. P. 290.
5. Namiot A. Yu. Phasovie ravnovesia v dobieche nefti. M.: Nedra, 1976. 183 p. [in Russian]
6. Sabirzyanov A.N., Shagiakhmetov R.A., Gabitov F.R., Tarzimanov A.A., Gumerov F.M. // Theor. Found. Chem. Eng. 2003. Vol. 37. No 1. P. 51.
7. Mather A.E., Franck E.U. // J. Phys. Chem. 1992. Vol. 96. P. 6.
8. Sabirzyanov A.N., Il'in A.P., Akhunov A.R., Gumerov F.M. // Teplofizika vysokikh temperatur. 2002. Vol. 40 (2). P. 231.
9. King M.B., Mubarak A., Kim J.D., Bott T.R. // J. Supercrit. Fluids. 1992. Vol. 5. P. 296.
10. Nino-Amézquita G., Van Putten D., Enders S. // Fluid Phase Equilibria. 2012. Vol. 332. P. 40.
11. Shyu G.S., Nishawn S.M. Hanif, Hall K.R., Eubank P.T. // Fluid Phase Equilibria. 1997. Vol. 130. P. 73.
12. Wiebe R. // Chem. Rev. 1941. Vol. 29(3). P. 475.
13. Briones J. A., Mullins J. C., Thies M. C., Kim B.U. // Fluid Phase Equilibria. 1987. Vol. 36. P. 235.
14. Song K.Y., Kobayashi R. // SPE Formation Evaluation. 1987. Vol. 2(04). P. 500.
15. Konynenburg H.V., Scott R.L. // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1980. Vol. 298(1442). P. 495.
16. Williams D. F. // J. Chem. Eng. Science. 1981. V.36. No 11. P. 1769.
17. Olds R.H., Sage B.H., Lacey W.N. // Ind. Eng. Chem. Res. 1942. Vol. 34. No 10. P. 1223.
18. Mohammadi A.H., Чапов А., Richon D., Tohidi B. // Ind. Eng. Chem. Res. 2004. Vol. 43(22). P. 7148.
19. Böttger A., Kamps A., Maurer G. // Fluid Phase Equil. 2016. Vol. 407. P. 209.
20. Song K.Y., Kobayashi R. // Fluid Phase Equilibria. 1994. Vol. 95. P. 281.
21. Yang S.O., Cho S.H., Lee H., Lee C.S. // Fluid Phase Equilibria. 2001. V. 185. N. 1—2. P. 53.
22. Brooks W.B., Gibbs G.B., McKetta J. Jr. // Petrol. Refiner. 1951. Vol. 30 (10). P. 118.
23. Oliveira M.B., Coutinho J.A.P., Queimada A.J. // Fluid Phase Equil. 2007. Vol. 258. P. 58.
24. Tabasinejad F., Moore G. R., Mehta S. A., Van Fraassen K. C., Barzin Y. // Ind. Eng. Chem. Res. 2011. Vol. 50. P. 4029.
25. Kobayashi R., Katz D. // Ind. Eng. Chem. 1953. Vol. 45(2). P. 440.
26. Juntarachat N. // J. Chem. Eng. Data. 2013. Vol. 58. P. 671.
27. Beranek P. // Fluid Phase Equilibria. 1981. Vol. 6. P. 279.
28. Khairutdinov V.F., Gumerov F.M., Zaripov Z.I., Khabriev I.Sh., Yarullin L. Yu., Abdulagatov I.M. // J. Supercrit. Fluids. 2020. Vol. 156. P. 104628.
29. Khairutdinov V.F., Gumerov F.M., Khabriev I.Sh., Farakhov M.I., Salikhov I.Z., Polishuk I., Abdulagatov I.M. // Fluid Phase Equilibria. 2020. Vol. 510. P. 112502.
30. Mukhopadhyay M., Rao G.V.R. // Ind. Eng. Chem. Res. 1993. Vol. 32, P. 922.
31. Bilalov T.R., Gumerov F.M., Le Neindre B. Description and generalization of solubility in supercritical fluids. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG. DudweilerLandstr. 99, 66123 Saarbrücken, Germany. 2018. 113 p.
32. Bilalov T.R., Gumerov F.M. // Russ. J. Phys. Chem. B. 2019. Vol. 13. P. 1290.