



Показано, что максимальная адсорбция у модифицированного гранулированного глауконита в 1,5–1,7 раз выше, чем у природного и немодифицированного образцов. Вероятно, такое увеличение сорбционных показателей обусловлено комплексной обработкой гранул растворами кислоты и соли, за счет чего увеличивается количество центров молекулярной и ионообменной адсорбции на поверхности сорбента.

Выводы

Изучена сорбционная активность трех видов глауконита (природного, гранулированного и гранулированного модифицированного) и определено, что активность последнего в 1,5–1,7 раз выше, чем у природного и немодифицированного образцов.

Построены изотермы адсорбции для всех образцов глауконита для всех катионов. Ленгмюровский характер полученных изотерм свидетельствует о том, что в процессе адсорбции на всех изучаемых образцах глауконитов задействованы активные центры, заполнение которых катионами тяжелых металлов из раствора способствует насыщению адсорбента.

Исследуемые катионы тяжелых металлов адсорбируются образцами глауконитовых сорбентов неодинаково. Сорбционная активность образцов увеличивается в следующем ряду: $Fe^{2+} < Mn^{2+} < Cu^{2+} < Cd^{2+}$, при этом величины максимальной адсорбции катионов Fe^{2+} и Mn^{2+} , Cu^{2+} и Cd^{2+} на образцах глауконитовых сорбентов близки между собой.

Модифицированный гранулированный глауконит является перспективным высокоэффективным сорбентом для очистки природных и сточных вод.

Результаты работы получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 4.1299.2014/К.

Список литературы

1. Будиловский Ю. Я. Эффективная и доступная технология очистки промышленных стоков // Экология и промышленность. 1996. № 7. С. 20–22.
2. Синельцев А. А., Вениг С. Б., Калинин Ю. А., Рыбков В. С., Сержантов В. Г., Стародубов А. В., Захаревич А. М. СВЧ-термообработка комплексных гранулированных сорбентов на основе природного глауконита // Физика и химия обработки материалов. 2012. № 6. С. 88–93.
3. Синельцев А. А., Губина Т. И., Степанов А. Н., Сержантов В. Г., Рыбков В. С., Казаринов И. А. Адсорбция ионов свинца (II) и никеля (II) из водных растворов на комплексном гранулированном глауконитовом сорбенте // Техногенная и природная безопасность : сб. тр. Первой Всерос. науч. конф. (Саратов, 1–3 февр. 2011 г.). Саратов : ИЦ «Наука», 2011. С. 54–56.
4. Синельцев А. А., Губина Т. И., Степанов А. Н., Скиданов Е. В., Сержантов В. Г., Голец А. В., Казаринов И. А. Химически модифицированные гранулированные сорбенты на основе природного глауконита для обезжелезивания воды // Техногенная и природная безопасность : сб. тр. Первой Всерос. науч. конф. (Саратов, 1–3 февр. 2011 г.). Саратов : ИЦ «Наука», 2011. С. 57–59.
5. Синельцев А. А., Вениг С. Б., Сержантов В. Г., Рыбков В. С., Скиданов Е. В. Исследование морфологии и химического состава комплексных гранулированных наноструктурированных сорбентов для выбора оптимального технологического решения изготовления гранул // Техногенная и природная безопасность : сб. тр. Первой всерос. науч. конф. (Саратов, 1–3 февраля 2011 г.). Саратов : ИЦ «Наука», 2011. С. 50–53.
6. Воюцкий С. С. Курс коллоидной химии. М. : Химия, 1975. 512 с.

УДК [544.344.016+536.44]:[544.344.013–14+544.344.4]

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ФАЗОВОЙ ДИАГРАММЫ РАЗРЕЗА 1 ТЕТРАЭДРА СОСТАВА ЧЕТВЕРНОЙ СИСТЕМЫ НИТРАТ КАЛИЯ – ВОДА – ПИРИДИН – МАСЛЯНАЯ КИСЛОТА В ИНТЕРВАЛЕ 5–60°C



Д. Г. Черкасов, З. В. Чепурина, В. Ф. Курский, К. К. Ильин

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: ilinkk@info.sgu.ru

Визуально-политермическим методом в интервале 5–60°C исследованы фазовые равновесия и критические явления в смесях

компонентов разреза 1 тетраэдра состава четверной системы нитрат калия – вода – пиридин – масляная кислота, включающей тройную жидкостную систему с замкнутой бинальной кривой. Установлено, что с повышением температуры в тетраэдре состава осуществляется контакт объемов двух монотектических состояний критическими нодами. Показано, что эффект выс-



ливания смесей пиридина с масляной кислотой из водных растворов нитратом калия усиливается с повышением температуры. Изотермы фазовых состояний системы, построенные на плоскости треугольника разреза при восьми температурах, позволили выявить топологическую трансформацию фазовой диаграммы разреза тетраэдра состава с изменением температуры.

Ключевые слова: фазовые равновесия, критические явления, четверная система, фазовая диаграмма, топологическая трансформация, пиридин, масляная кислота, калия нитрат, визуально-политермический метод, замкнутая область расслаивания, монотектика, критическая точка растворимости.

Topological Transformation of Phase Diagrams for Cut 1 of the Quaternary System Potassium Nitrate – Water – Pyridine – Butyric Acid in 5–60°C

D. G. Cherkasov, Z. V. Chepurina, V. F. Kurskii, K. K. Il'in

Phase equilibria and critical phenomena in component mixtures of the cut 1 of the quaternary system Potassium Nitrate – Water – Pyridine – Butyric Acid whose constituent ternary liquid system had a closed binodal curve were studied by means of the visual-polythermal method within 5–60°C. The volumes of two monotectic states in the composition tetrahedron have been found to be in contact via critical tie lines with increasing temperature. It is shown that the effect of salting-out of mixtures Pyridine and Butyric Acid from its aqueous solutions by potassium nitrate increases with an increase of temperature. Phase state isotherms constructed on the triangle of the cut for eight temperatures have allowed topological transformation of the phase diagram for the examined cut of the composition tetrahedron with temperature changes to be revealed.

Key words: phase equilibria, critical phenomena, quaternary system, phase diagram, topological transformation, pyridine, butyric acid, potassium nitrate, visual-polythermal method, closed binodal curve, monotectic, solubility critical point.

DOI: 10.18500/1816-9775-2016-16-3-262-269

В экстракционной практике все большее применение находят нетрадиционные экстракционные тройные системы [1]. Одним из главных достоинств таких систем является отсутствие среди компонентов легколетучих и горючих растворителей, например углеводородов. В таких системах часто существует замкнутая бинадальная кривая, возникновение которой Р. В. Мерцлин [2] и его последователи [3–5] связывают с химическим взаимодействием между компонентами одной двойной пограничной системы. Введение солей, обладающих высаливающим действием, способствует оптимизации экстракционного процесса за счет увеличения размеров области двух жидких фаз.

Ранее нами [6–8] были изучены фазовые равновесия и критические явления в смесях компонентов трех разрезов четверной системы хлорид калия–вода–пиридин–масляная кислота,

в которой входящая тройная жидкостная система имеет замкнутую бинадальную кривую [9]. Найдено, что хлорид калия обладает только высаливающим действием на водные растворы пиридина и масляной кислоты. Установлено, что объемы монотектических состояний в объеме тетраэдра состава этой четверной системы при повышении температуры вступают в контакт критическими нодами. В то же время вопрос о топологической трансформации фазовых диаграмм четверных систем соль–три растворителя, включающих тройную жидкостную систему с замкнутой бинадальной кривой, при изменении температуры остается еще малоизученным.

Представляло интерес исследовать влияние другой соли калия (например, KNO_3), имеющей больший радиус аниона, на фазовое поведение тройной жидкостной системы вода–пиридин–масляная кислота с изменением температуры. Настоящая работа посвящена политермическому изучению фазовых равновесий и критических явлений в четверной системе нитрат калия – вода – пиридин – масляная кислота с целью выявления закономерностей топологической трансформации фазовой диаграммы разреза системы с изменением температуры.

В четверную систему нитрат калия – вода – пиридин – масляная кислота входят четыре составляющих тройных системы: вода–пиридин–масляная кислота, нитрат калия–вода–пиридин, нитрат калия–вода–масляная кислота, нитрат калия – пиридин – масляная кислота. Кратко охарактеризуем растворимость компонентов и фазовые равновесия в этих системах.

Система вода–пиридин–масляная кислота

Изотермические диаграммы растворимости системы в интервале 5.0–51.5°C характеризуются наличием замкнутой бинадальной кривой [9]. Растворимость компонентов возрастает с увеличением температуры. Объем двухжидкофазного состояния при повышении температуры исчезает через некритическую точку при 52.0°C.

Система нитрат калия – вода – пиридин

Данных по растворимости и фазовым равновесиям в тройной системе нитрат калия–вода–пиридин в литературе не обнаружено. Нами были исследованы смеси компонентов по одному сечению треугольника состава в интервале 5.0–90.0°C, которые характеризовались переменным содержанием пиридина и постоянным соотношением масс нитрата калия и воды – 45.00:55.00. Установлено, что температура образования критической ноды монотектического состояния равна 45.6°C и выше нее нитрат калия расслаивает смеси воды и пиридина.



Система нитрат калия – вода – масляная кислота

Данных по растворимости и фазовым равновесиям в этой тройной системе в литературе не обнаружено. Нами были исследованы смеси компонентов по одному сечению треугольника состава в интервале 5.0–100.0°C, которые характеризовались переменным содержанием масляной кислоты и постоянным соотношением масс нитрата калия и воды – 45.00:55.00. Установлено, что температура образования критической ноды монотектического состояния равна 18.0°C и выше этой температуры нитрат калия расслаивает смеси воды и масляной кислоты.

Система нитрат калия – пиридин – масляная кислота

Данных по растворимости в системе нитрат калия – пиридин – масляная кислота в литературе не найдено. Поскольку нитрат калия, по нашим данным, в указанных растворителях, а также в их смесях различного состава практически нерастворим, то почти весь треугольник состава этой системы занимает поле насыщенных растворов соли в бинарном растворителе. Это поле отделено плавной линией растворимости от поля гомогенно-жидкого состояния, границы которого не уточнялись ввиду его малых размеров при всех температурах исследования.

Экспериментальная часть

Используемые в работе растворители подвергали тщательной очистке как описано в [9]. Растворители идентифицировали по температуре кипения, показателю преломления и плотности; их физические константы хорошо согласовались со справочными данными [10]. В работе использовали нитрат калия квалификации «ч.д.а.», дополнительно перекристаллизованный, тонко растертый и высушенный в вакууме над оксидом фосфора (V) при 100°C до постоянной массы. Отсутствие влаги в соли контролировали термogrавиметрическим анализом. Подготовленные препараты пиридина, масляной кислоты и соли хранили над прокаленным хлоридом кальция в эксикаторах, защищенных от прямого воздействия световых лучей.

Изучение фазовых равновесий в смесях компонентов четверной системы проводили визуально-политермическим методом, а составы растворов, соответствующие критическим точкам критических нод, определяли методом отношения объемов фаз [11]. Методика обработки результатов политермического исследования и построения изотермических фазовых диаграмм разреза четверной системы

изложена в [11]. Относительная погрешность определения составов смесей, отвечающих точкам фазовых переходов, была $\pm 0.5\%$.

Фазовые равновесия и критические явления в смесях компонентов изучали по четырнадцати сечениям треугольника разреза 1 тетраэдра состава указанной четырехкомпонентной системы в интервале температур от 5 до 60°C. Разрез был проведен через ребро тетраэдра состава пиридин–масляная кислота и точку ребра вода–нитрат калия, отвечающую 45.00 мас.% соли (рис. 1). Выбор положения разреза определялся тем, чтобы пересечь в тетраэдре состава все объемы фазовых равновесий с наличием твердой фазы.

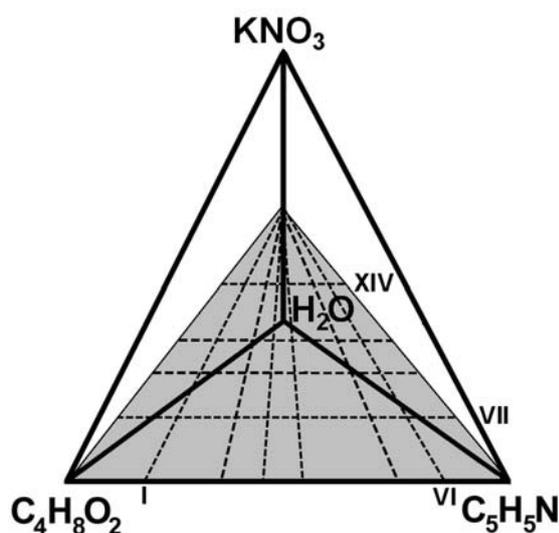


Рис. 1. Схематическое положение разреза 1 и сечений I–XIV на плоскости треугольника разреза 1 тетраэдра состава системы нитрат калия – вода – пиридин – масляная кислота

Результаты и их обсуждение

Четырехкомпонентные смеси по сечениям I–VI (см. рис. 1) характеризовались переменным содержанием смеси соли с водой указанного состава и постоянным для каждого сечения соотношением масс пиридина и масляной кислоты: 15:85(I), 30:70(II), 42:58(III), 53:47(IV), 65:35(V), 94:6(VI). В этих смесях осуществлялись два фазовых состояния: монотектическое равновесие $\ell_1 + \ell_2 + S$ и насыщенные растворы $\ell + S$ (политермы не приводятся). Твердая фаза (S) при всех температурах интервала исследования отвечала по составу индивидуальной соли (нитрат калия).

Смеси компонентов по сечениям VII–XIV (см. рис. 1) характеризовались переменным соотношением масс пиридина и масляной кислоты и постоянным для каждого сечения содержанием смеси нитрата калия с водой: 40.00 (VII), 50.00



(VIII), 60.00 (IX), 70.00 (X), 75.00 (XI), 79.00 (XII), 80.00 (XIII), 85.00 (XIV). Политермы фазовых состояний системы по этим сечениям представлены на рис. 2. Политермы по сечениям VII–X и XIII аналогичны. Они состоят из двух кривых, имеющих температурные максимумы и разделяющих поле монотектики l_1+l_2+S и поля насыщенных растворов l_1+S , l_2+S . Смеси компонентов по сечениям XI, XII и XIV были исследованы в области высоких концентраций пиридина в смеси

с масляной кислотой и поэтому их политермы состоят только из одной кривой с максимумом. Координаты точек, отвечающих максимумам на политермах по сечениям VII–XIV, тщательно определялись. Особое внимание при исследовании смесей компонентов уделяли критическим явлениям. При изучении смесей компонентов по сечениям X–XIII найдены смеси с равными объемами жидких фаз, находящихся в равновесии с кристаллами соли (обозначены KS на рис. 2).

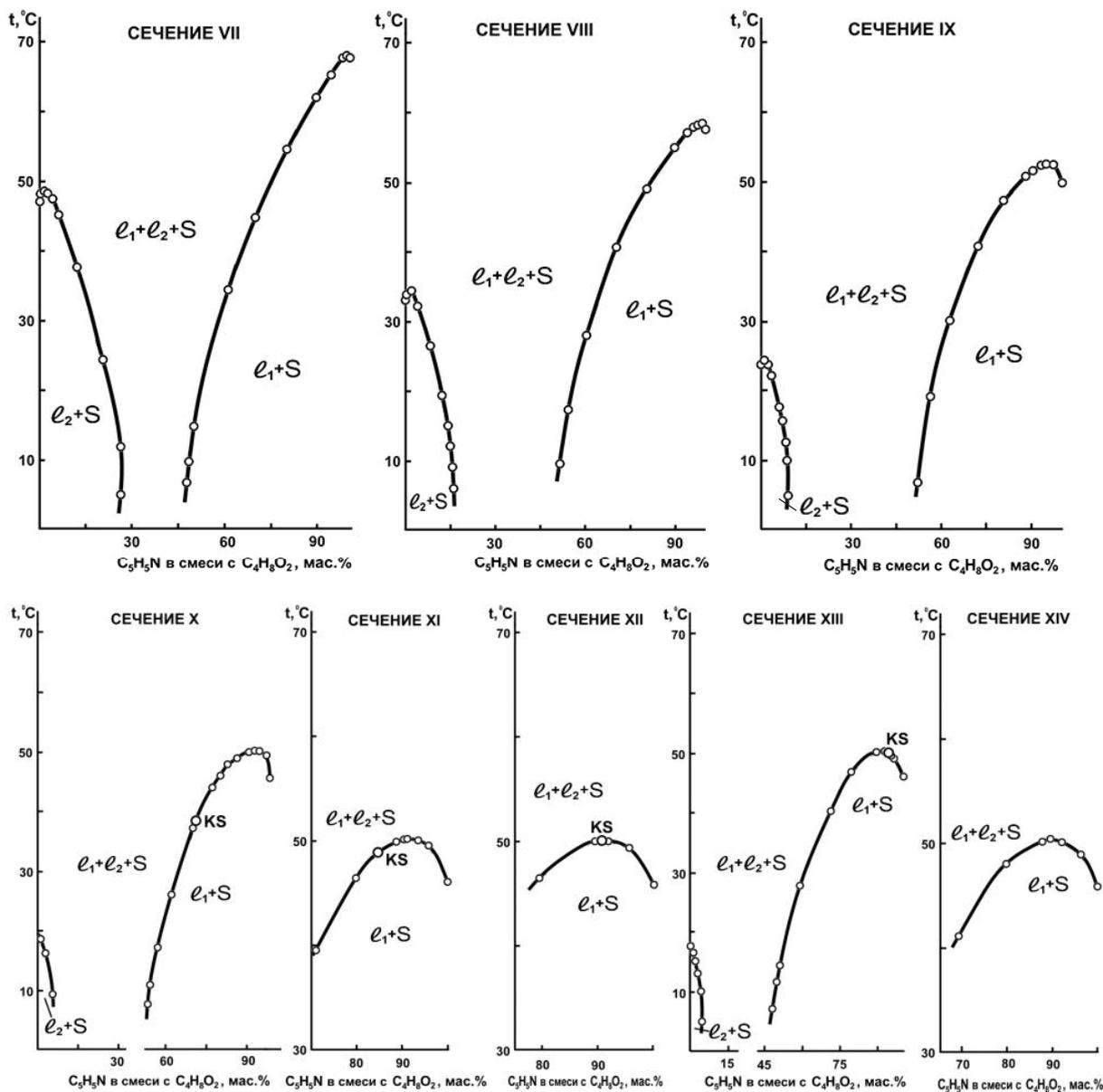


Рис. 2. Политермы фазовых состояний по сечениям VII–XIV разреза 1 тетраэдра состава четверной системы нитрат калия – вода – пиридин – масляная кислота

Эти точки принадлежат критическим нодам $K'S$ и $K''S$ объемов монотектических состояний $l'_1+l'_2+S$ и $l''_1+l''_2+S$, которые пересекаются

плоскостью разреза 1 в тетраэдре состава. Для определения зависимости содержания пиридина в смеси с масляной кислотой и смеси пиридина



с масляной кислотой в критических растворах, соответствующих точкам критической ноды K_1S , от температуры, были исследованы смеси компонентов двух дополнительных сечений. Они характеризовались переменным содержанием смеси соли с водой и постоянным для каждого сечения соотношением масс пиридина и масляной кислоты: 35.1:64.9, 38.7:61.3. Эти кривые начинаются при температуре 45.6°C в точке, принадлежащей критической ноде монотектического состояния тройной системы нитрат калия–вода–пиридин.

Для определения температуры и способа контакта объемов монотектических состояний $l'_1+l'_2+S$ и $l''_1+l''_2+S$ были построены за-

висимости составов критических растворов, отвечающих точкам $K'S$ и K'' критических нод этих состояний (рис. 3, а, кривая 1 и рис. 3, б) и максимумов политерм растворимости по сечениям IX–XIV (рис. 3, а, кривая 2) от температуры.

У кривых 1 и 2 при 50.1°C (см. рис. 3, а) есть общий экстремум, приходящийся на точку KS , принадлежащую экстремальной точке политермы по сечению XII (см. рис. 2). Таким образом, соприкосновение кривых 1 и 2 в точке KS (см. рис. 3) доказывает, что объемы двух монотектических состояний $l'_1+l'_2+S$ и $l''_1+l''_2+S$ вступают в контакт по критическим нодам $K'S$ и K'' внутри тетраэдра состава, в результате чего образуется единая критическая нода KS .

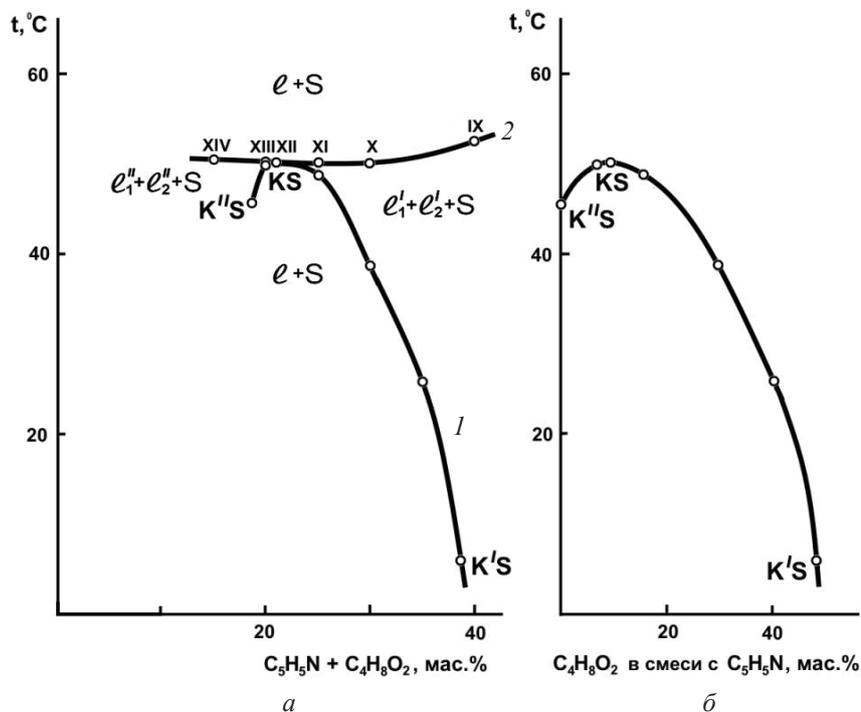


Рис. 3. Зависимости содержания смеси пиридина и масляной кислоты в четверных смесях, отвечающих критическим точкам $K'S$ и $K''S$ критических нод объемов монотектических состояний $l'_1+l'_2+S$ и $l''_1+l''_2+S$ (кривая 1) и максимумам политерм растворимости по сечениям IX–XIV (кривая 2) от температуры (а) и зависимости содержания масляной кислоты в смеси с пиридином в критических растворах от температуры (б) в разрезе 1 тетраэдра состава четверной системы нитрат калия – вода – пиридин – масляная кислота

Для определения зависимостей содержания пиридина в смеси с масляной кислотой и смеси пиридина с масляной кислотой в критических растворах, соответствующих точкам критической ноды K_1S , от температуры, были исследованы смеси компонентов двух дополнительных сечений. Они характеризовались переменным соотношением

масс пиридина и масляной кислоты и постоянным для каждого сечения содержанием смеси нитрата калия с водой: 77.55 и 77.57. Кривые построенных зависимостей начинаются при температуре 18.0°C в точке, принадлежащей критической ноде монотектического состояния тройной системы нитрат калия – вода – масляная кислота (рис. 4).

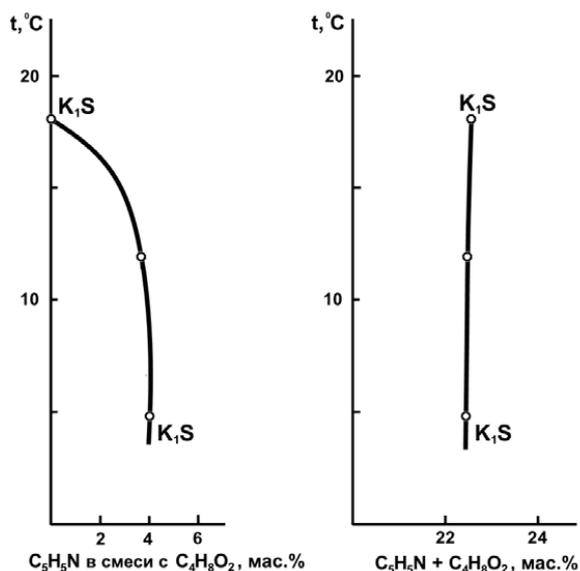


Рис. 4. Зависимости содержания пиридина в смеси с масляной кислотой и смеси пиридина с масляной кислотой в критических растворах, соответствующих точкам критической ноды K_1S , от температуры в разрезе 1 тетраэдра состава четверной системы нитрат калия – вода – пиридин – масляная кислота

Результаты политермических исследований (см. рис. 2–4) использовали для построения изотерм фазовых состояний системы на треугольнике разреза четверной системы при восьми температурах: 5.0, 18.0, 25.0, 45.6, 48.0, 50.1, 52.0 и 60.0°C (рис. 5–7).

При 5.0°C в составляющих тройных системах нитрат калия–вода–масляная кислота и нитрат калия–вода–пиридин осуществляется простая растворимость соли в бинарных растворителях. Поэтому на изотерме при этой температуре (см. рис. 5) существует замкнутая кривая, отделяющая поле первого монотектического состояния $l'_1+l'_2+S$ от поля насыщенных растворов $l+S$. На этой кривой находятся критические точки $K'S$ и K_1S (обозначены большими кружками), принадлежащие критическим нодам монотектического состояния. Граница поля гомогенно-жидкого состояния l (обозначена на диаграммах пунктирной линией) не уточнялась при всех температурах ввиду его очень малых размеров.

Температура 18.0°C соответствует началу расслаивания и образования критической ноды монотектического состояния в пограничной тройной системе нитрат калия–вода–масляная кислота. При этой температуре поле монотектики $l'_1+l'_2+S$ касается стороны треугольника разреза, отвечающей указанной тройной системе, критической точкой K_1S критической ноды монотектики (см. рис. 5). Площадь поля монотектики на изотерме при 18.0°C больше, чем на изотерме при 5.0°C. Следовательно, с повышением температуры происходит увеличение высаливающего действия нитрата калия на смеси пиридина, масляной кислоты и воды.

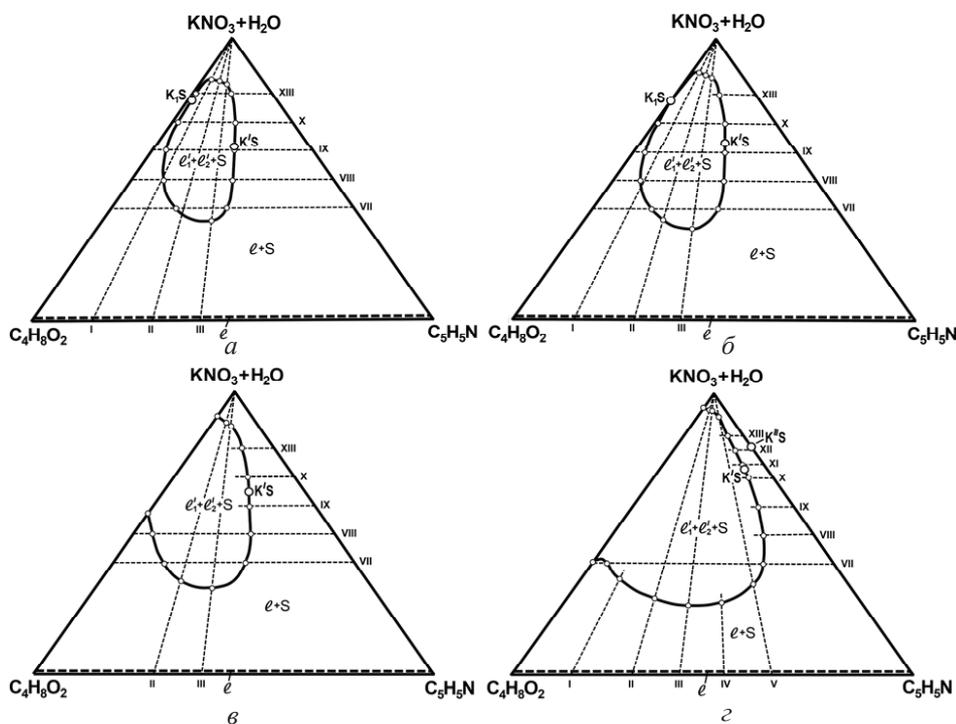


Рис. 5. Изотермы фазовых состояний разреза 1 (мас.%) четверной системы нитрат калия – вода – пиридин – масляная кислота при: а – 5.0; б – 18.0; в – 25.0; г – 45.6 °C



С дальнейшим повышением температуры из критической ноды K_1S в температурно-концентрационной призме тройной системы нитрат калия–вода–масляная кислота развивается объем монотектического состояния. На изотерме разреза, например при 25.0°C (см. рис. 5), это отражается увеличением размеров поля монотектики $l'_1+l'_2+S$, которое примыкает к стороне треугольника состава, отвечающей пограничной системе нитрат калия – вода – масляная кислота.

При температуре 45.6°C на стороне треугольника разреза (см. рис. 5), отвечающей составляющей тройной системе нитрат калия–вода–пиридин, появляется критическая точка $K''S$, принадлежащая критической ноды $K''S$. Данная температура соответствует началу расщепления в этой тройной системе. С дальнейшим повышением температуры в объеме температурно-концентрационной призмы системы критическая ноды $K''S$ трансформируется в объем монотектики $l''_1+l''_2+S$. На изотерме разреза при 48.0°C (см. рис. 6) существует небольшое поле монотектического состояний $l''_1+l''_2+S$ с критической точкой $K''S$, примыкающее к стороне треугольника разреза $(\text{KNO}_3+\text{H}_2\text{O}) - \text{C}_5\text{H}_5\text{N}$. При этом наблюдается сближение критических точек $K'S$ и $K''S$ соответствующих критических нод. На изотерме при 50.1°C (см. рис. 6) наблюдается соприкосновение полей монотектического состояния критическими точками $K'S$ и $K''S$ с образованием единой критической точки KS .

Очевидно, при более высоких температурах будет наблюдаться сначала частичное, а затем полное взаимопроникновение двух объемов монотектик с образованием единого объема

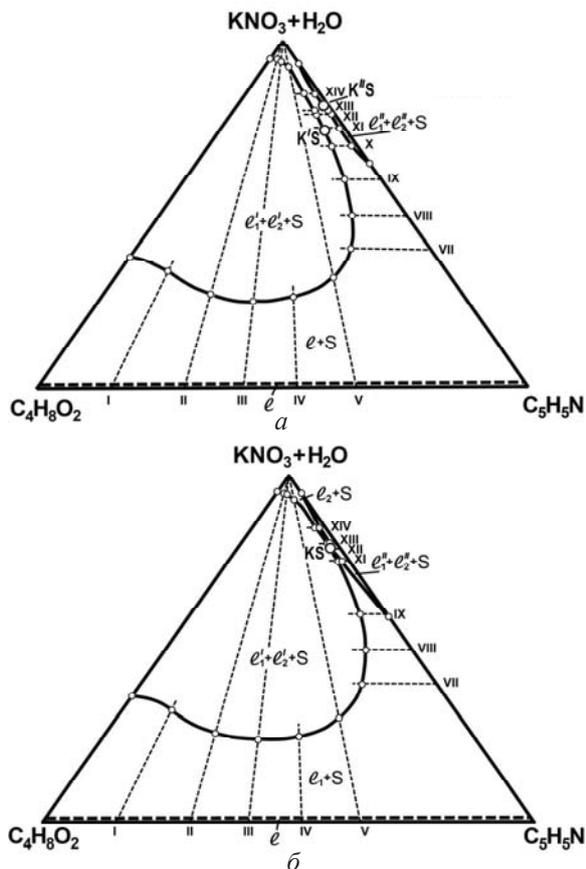


Рис. 6. Изотермы фазовых состояний разреза 1 (мас.%) четверной системы нитрат калия–вода–пиридин–масляная кислота при: *a* – 48.0°C ; *б* – 50.1°C

монотектического состояния l_1+l_2+S . Например, на изотерме при 52.0°C (см. рис. 7) наблюдается неполное взаимопроникновение полей монотектических состояний с образованием единого поля монотектики l_1+l_2+S , характеризующегося наличием двух экстремумов на его границах.

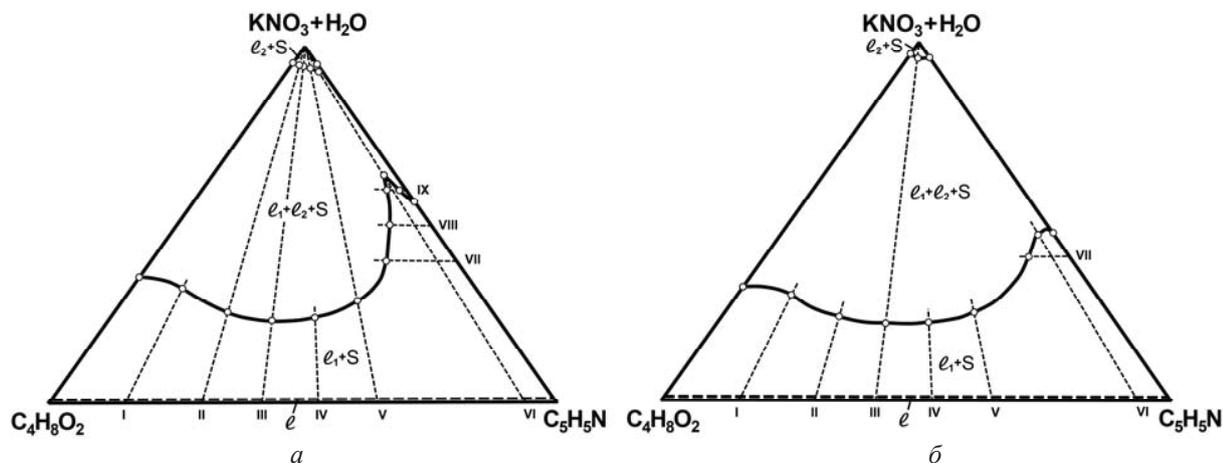


Рис. 7. Изотермы фазовых состояний разреза 1 (мас.%) четверной системы нитрат калия–вода–пиридин–масляная кислота при: *a* – 52.0°C ; *б* – 60.0°C



Дальнейшее повышение температуры не приводит к каким-либо качественным изменениям фазовой диаграммы разреза: наблюдается сглаживание указанных экстремумов (изотерма при 60.0°C, см. рис. 7), увеличивается поле монотектики $\ell_1 + \ell_2 + S$ и уменьшаются поля насыщенных растворов $\ell_1 + S$ и $\ell_2 + S$.

Таким образом, полученные результаты позволили выявить закономерности топологической трансформации фазовой диаграммы разреза 1 четверной системы нитрат калия–вода–пиридин–масляная кислота при изменении температуры, а также подтвердить фрагмент варианта схемы топологической трансформации фазовых диаграмм четверных систем соль–три растворителя, включающих тройную жидкостную систему с замкнутой областью расслаивания [12].

Нами были проведены сравнение и анализ изотермических фазовых диаграмм аналогичного разреза ранее изученной четверной системы хлорид калия – вода – пиридин – масляная кислота [6] и исследованного разреза четверной системы нитрат калия – вода – пиридин – масляная кислота с целью выяснения влияния размера аниона на высаливающее действие соли по отношению к смесям воды, пиридина и масляной кислоты. Установлено, что площадь поля монотектического состояния при одних и тех же относительно низких температурах уменьшается при переходе от KCl к KNO₃, т.е. с увеличением радиуса аниона высаливающее действие соли ослабляется. При максимальной температуре исследования для каждой из указанных систем (80°C для системы с KCl и 60°C для системы с KNO₃) изотермические диаграммы аналогичны и эти соли характеризуются достаточно сильным высаливающим эффектом.

В объеме тетраэдра состава изученных четверных систем установлен один и тот же способ контакта двух объемов монотектических состояний, а именно, их критическими нодами. В каждой из указанных систем определена температура контакта объемов монотектических состояний критическими нодами внутри тетраэдра состава, выше которой наблюдается образование единого объема монотектики (25.8°C для системы с KCl и 50.1°C для системы с KNO₃). Очевидно, возрастание температуры контакта объемов монотектик в указанных четверных системах обусловлено уменьшением степени гидратации аниона по мере увеличения его радиуса от хлорид- к нитрат-иону при одинаковом катионе. Это также свидетельствует о более слабом высаливающем действии нитрата калия по сравнению с хлоридом калия.

Список литературы

1. Яковлева Т. П., Леснов А. Е., Петров Б. И., Денисова С. А. Жидкофазные и экстракционные равновесия в нетрадиционных экстракционных системах, содержащих производные пиразолона // Избранные главы физико-химического анализа : в 2 ч. / Перм. ун-т; ЕНИ при Перм. ун-те. Пермь, 2003. Ч. 1. С. 135–171.
2. Мерцлин Р. В. О системах с верхней тройной критической точкой // Журн. общ. химии. 1936. Т. 6, № 12. С. 1828–1840.
3. Журавлев Е. Ф. О системах с нижней тройной критической точкой // Журн. общ. химии. 1959. Т. 29, № 10. С. 3178–3183.
4. Крупаткин И. Л., Рожнецова П. О. О поведении двойных скрытно-расслаивающихся систем в тройных системах // Журн. физ. химии. 1970. Т. 44, № 4. С. 1036–1039.
5. Сергеева В. Ф., Матюшинская Л. Б. Равновесие жидкость–жидкость в системах вода–изомасляная кислота–пиридин–(2-метилпиридин, 2,4-диметилпиридин, 2,4,6-триметилпиридин) // Журн. общ. химии. 1977. Т. 47, № 6. С. 1215–1218.
6. Черкасов Д. Г. Фазовые равновесия и критические явления в разрезе 1 четверной системы вода – пиридин – масляная кислота – хлорид калия // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. 2008. Т. 8, вып. 2. С. 28–36.
7. Черкасов Д. Г. Фазовые равновесия и критические явления в разрезе 2 четверной системы вода – пиридин – масляная кислота – хлорид калия // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. 2009. Т. 9, вып. 2. С. 36–40.
8. Черкасов Д. Г. Фазовые равновесия и критические явления в разрезе 3 четверной системы вода – пиридин – масляная кислота – хлорид калия // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. 2010. Т. 10, вып. 2. С. 14–19.
9. Черкасов Д. Г., Смотров М. П., Ильин К. К. Равновесие двух жидких фаз и критические явления в тройной системе вода – пиридин – масляная кислота в интервале 5–55 °C // Журн. прикл. химии. 2008. Т. 81, № 2. С. 229–233.
10. Химическая энциклопедия : в 5 т. / ред. И. Л. Кнунянц. М. : Сов. энцикл., 1988–1998. Т. 1–5.
11. Ильин К. К., Черкасов Д. Г. Равновесие трех жидких фаз и критические явления высшего порядка в четверных системах. Сообщение 2. Определение координат трикритической точки и топология объема трехжидкофазного состояния в системе вода – изопропиловый спирт – н.октан – бромид калия // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2006. Т. 49, № 1. С. 3–12.
12. Четурина З. В. Влияние солей на фазовое поведение тройных жидкостных систем с замкнутой областью расслоения : автореф. дис. ... канд. хим. наук. Саратов, 2015. 23 с.