

УДК 546: 544.344.4: 631.812.2

DOI: 10.17072/2223-1838-2020-3-246-256

**А.И. Белослудцева, Р.А. Шабанов, Н.С. Кистанова, М.С. Жаворонкова**

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАЗОВЫХ РАВНОВЕСИЙ И ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММЫ СИСТЕМЫ $\text{KH}_2\text{PO}_4 - \text{KNO}_3 - \text{KCl} - \text{K}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}$ ПРИ 25°C**

*Фазовые равновесия в ограничивающих четырехкомпонентных системах исследованы оптимизированным методом сечений. Экспериментально определены составы невариантных точек в трех ограничивающих системах. Показана эффективность алгоритма прогнозирования составов эвтонических растворов в многокомпонентных системах. На основании полученных данных рассчитан состав четырехкратно насыщенного раствора и построена фазовая диаграмма пятикомпонентной системы  $\text{KH}_2\text{PO}_4 - \text{KNO}_3 - \text{KCl} - \text{K}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  при 25 °С. На диаграмме показаны линии моновариантного равновесия и выделены области кристаллизации индивидуальных солевых компонентов. Рассчитаны величины  $N$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  в составах эвтонических растворов системы.*

**Ключевые слова:** дигидрофосфат калия; нитрат калия; хлорид калия; сульфат калия; фазовая диаграмма

**A.I. Belosludceva, R.A. Shabanov, N.S. Kistanova, M.S. Zhavoronkova**

Perm State University, Perm, Russia

### **STUDY OF PHASE EQUILIBRIUM AND CONSTRUCTION OF PHASE DIAGRAM FOR THE SYSTEM $\text{KH}_2\text{PO}_4 - \text{KNO}_3 - \text{KCl} - \text{K}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}$ AT 25 °C**

*Phase equilibria in the  $\text{KH}_2\text{PO}_4 - \text{KNO}_3 - \text{KCl} - \text{K}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  at 25 °C five-component water-salt system and its boundary systems have been studied at 25 °C by an optimized sections method. The compositions of saturated solutions of the three boundary systems have been obtained in the experiment. The efficiency of the algorithm for predicting the compositions of eutonic solutions in the multi-component systems has been shown. According to the experimental data, the phase diagram has been drawn. Monovariant equilibria lines and the areas of all four salts crystallize have been designed on the phase diagram. The values of  $N$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  have been calculated for the saturated solutions of the system.*

**Keywords:** monopotassium phosphate; potassium nitrate; potassium chloride; potassium sulfate; phase diagram

### Введение

Жидкие комплексные удобрения – это суспензии или водные растворы, содержащие необходимые растениям питательные макро- и микроэлементы в легкоусвояемой форме. В жидких комплексных удобрениях число питательных элементов можно достаточно широко регулировать. В отличие от твердых, жидкие комплексные удобрения обладают свободной текучестью, не пылят, не слеживаются, не содержат нерастворимого балласта, их потребительские свойства не зависят от влажности окружающей среды [1–3]. Калий, как и азот, и фосфор, относится к числу макроэлементов, играющих в жизни растений исключительно важную роль. Калий улучшает водный режим, способствует обмену веществ и образованию углеводов, повышает засухоустойчивость растений. Содержание калия в удобрениях выражают в пересчете на  $K_2O$ . Недостаток калия, особенно в жаркую погоду, ведет к усилению увядания растений, приостанавливает превращения простых сахаров в более сложные, тормозит синтез белка [4]. Особенно важную роль в минеральном питании растения играет азот, входящий в состав белков и хлорофилла, с помощью которого растения усваивают углерод из находящегося в атмосфере углекислого газа. Растения извлекают азот из минеральных солей (солей аммония и нитратов). Соединения фосфора играют важную роль в дыхании и размножении растений. Усиление питания фосфором повышает засухоустойчивость и морозостойкость растений. Восприимчивость растений фосфорных удобрений зависит от их растворимости и от характера почв, в первую очередь от кислотности почв. Наличие

в почве значительного запаса подвижной (усвояемой растениями) формы фосфора способствует хорошему использованию других удобрений – азотных и калийных. Содержание фосфора в фосфорных удобрениях принято выражать в пересчете на  $P_2O_5$ .

Соотношение питательных элементов в жидких комплексных удобрениях может быть различным, и это позволяет удовлетворить потребности разных культур с учетом свойств почв [4]. В жидких комплексных удобрениях в случае большой их концентрации происходит высаливание, кристаллизация солей при понижении температуры. Применение же менее концентрированных растворов приводит к необходимости перевозить большие количества растворителя – воды. Поэтому важно найти такие композиции жидких удобрений, которые имели бы высокие концентрации и низкие температуры кристаллизации.

Способ определения составов высококонцентрированных жидких комплексных удобрений основан на построении  $(n-1)$ -угольной фазовой диаграммы, вершины которой соответствуют простым удобрениям ( $n$ ) и  $H_2O$  [5–7]. Подбор компонентов и оптимизацию составов проводят на основании данных по фазовым равновесиям в поликомпонентных системах, содержащих исходные компоненты получаемого жидкого комплексного удобрения. Соотношение питательных веществ  $N$ ,  $P_2O_5$  и  $K_2O$  определяют в максимально насыщенных составах системы, которые являются единственно оптимальными в выбранной системе координат [8]. На основании диаграммы растворимости системы, содержащей исходные компоненты жид-

кого комплексного удобрения, определяют величину максимальной совместной растворимости солей, которая соответствует координатам эвтонических точек.

Растворы четырех компонентов дигидрофосфата калия, нитрата калия, хлорида калия и сульфата калия с общим ионом образуют простую пятикомпонентную систему  $\text{KH}_2\text{PO}_4\text{--KNO}_3\text{--KCl--K}_2\text{SO}_4\text{--H}_2\text{O}$ . Для построения диаграммы четырехкомпонентной системы использована каноническая проекция тетраэдра. На ребрах фигуры располагаются двухкомпонентные системы, на гранях – трехкомпонентные, в основании – безводные системы из трех солей, а внутри фигуры – четырехкомпонентная система. Состав компонентов выражен в масс. %. Проекция пятикомпонентной системы построены в виде фигуры с произвольным расположением вершин по методике, описанной в работе [9]. Какие-либо графические расчеты по проекциям не проводили.

Система  $\text{KNO}_3\text{--KH}_2\text{PO}_4\text{--KCl--K}_2\text{SO}_4\text{--H}_2\text{O}$  образована четырьмя четырехкомпонентными системами:  $\text{KNO}_3\text{--KH}_2\text{PO}_4\text{--KCl--H}_2\text{O}$  [10, 11];  $\text{KNO}_3\text{--KH}_2\text{PO}_4\text{--K}_2\text{SO}_4\text{--H}_2\text{O}$ ;  $\text{KH}_2\text{PO}_4\text{--KCl--K}_2\text{SO}_4\text{--H}_2\text{O}$ ;  $\text{KNO}_3\text{--KCl--K}_2\text{SO}_4\text{--H}_2\text{O}$ . Каждая четырехкомпонентная система, в свою очередь, образована тремя трехкомпонентными ограняющими системами. Системы  $\text{KCl--K}_2\text{SO}_4\text{--H}_2\text{O}$  [12],  $\text{KCl--KH}_2\text{PO}_4\text{--H}_2\text{O}$  [12],  $\text{K}_2\text{SO}_4\text{--KH}_2\text{PO}_4\text{--H}_2\text{O}$  [13],  $\text{KNO}_3\text{--KCl--H}_2\text{O}$  [12],  $\text{KNO}_3\text{--K}_2\text{SO}_4\text{--H}_2\text{O}$  [12] и  $\text{KNO}_3\text{--KH}_2\text{PO}_4\text{--H}_2\text{O}$  [14] – простого эвтонического типа, составы невариантных растворов насыщены индивидуальными солевыми компонентами. Фазовые равновесия в трех четырехкомпонентных системах изучены впервые.

### Экспериментальная часть

В работе использовали соли марки «хч». Содержание дигидрофосфата калия в его насыщенном растворе составило 20,0 % масс., нитрата калия – 27,5 % масс., хлорида калия – 26,5 % масс., сульфата калия – 10,7 % масс. При выполнении эксперимента исходные смеси компонентов заданного состава готовили взвешиванием на аналитических электронных весах AND GR-200 с точностью  $\pm 0,0001$  г. Показатель преломления жидкой фазы измеряли на рефрактометре ИРФ-454 Б2М с погрешностью  $\pm 1 \cdot 10^{-4}$  единиц. Термостатирование осуществляли при помощи циркуляционного термостата LOIP LT-316a с погрешностью  $\pm 0,2^\circ\text{C}$  и шейкера DAIHAN WiseShake SHO-2D.

Фазовые равновесия в четырехкомпонентных системах исследованы оптимизированным методом сечений [15, 16]. Сущность метода сечений состоит в определении точек изломов изотерм функциональных зависимостей показателя преломления равновесной жидкой фазы различных исходных смесей компонентов, составы которых доведены до равновесия и закономерно меняются по сечениям и разрезам фигуры состава. О достижении равновесия судят по постоянной во времени величине показателя преломления жидкой фазы гетерогенных смесей. Каждому виду фазового равновесия системы на графике соответствует определенная функциональная линия, а точки пересечения линий указывают на состав, лежащий в данном сечении на границе полей с разным фазовым состоянием системы. Метод включает в себя прогнозирование и вычисление предполагаемого состава невариантного раствора, определение составов на границах фазовых

переходов и вычисление по ним составов жидких и твердых фаз, находящихся в невариантном равновесии [16–18].

Для определения состава тройного эвтонического раствора использовали его предполагаемый состав, который определялся по следующей методике (рис. 1). Составы невариантных точек ограничивающих систем располагают в порядке уменьшения содержания в них воды:  $e_3, e_2, e_1$ . Затем вычисляют составы промежуточных точек. Первая промежуточная точка ( $T_1$ ) делит отрезок  $e_3e_2$ , соединяющий две невариантные точки ограничивающих систем с мак-

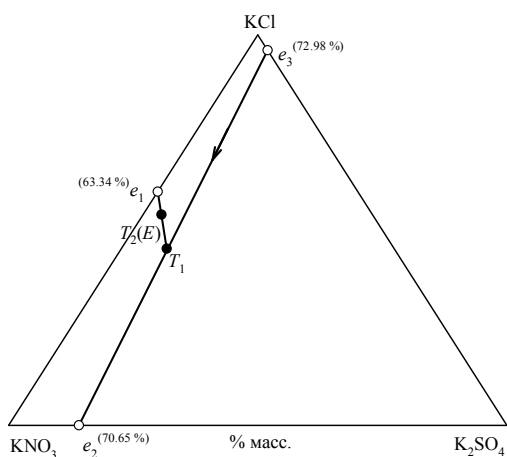


Рис. 1. Прогнозирование состава эвтонического раствора в системе  $\text{KNO}_3\text{--K}_2\text{SO}_4\text{--KCl--H}_2\text{O}$  при  $25\text{ }^\circ\text{C}$

симальным содержанием воды, на две части в соотношении (1). Вторая промежуточная точка ( $T_2$ ) делит отрезок  $T_1e_1$  на две части в соотношении (2). Последняя промежуточная точка ( $T_2$ ) является искомым предполагаемым составом трехкратно насыщенного раствора  $E$ . Результаты расчетов приведены в табл. 1. На основании предполагаемого состава эвтонического раствора  $T_2$  рассчитывается структура изогидрического разреза невариантной области системы (рис. 2):

$$e_3T_1/T_1e_2 = \{H_2O\}_{e_3} / \{H_2O\}_{e_2} \quad (1)$$

$$T_1T_2/T_2e_1 = \{H_2O\}_{T_1} / \{H_2O\}_{e_1} \quad (2)$$

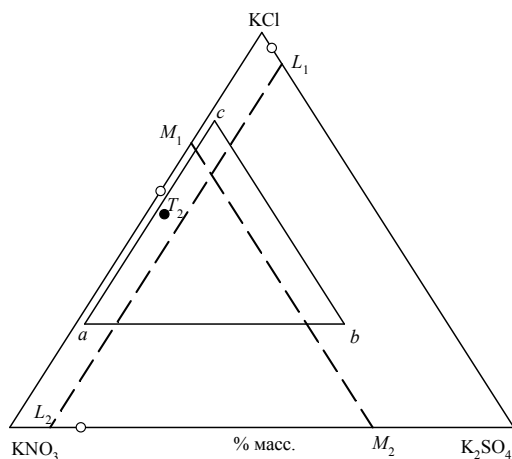


Рис. 2. Планирование сечений для определения границ изогидрического разреза невариантной области системы  $\text{KNO}_3\text{--K}_2\text{SO}_4\text{--KCl--H}_2\text{O}$  при  $25\text{ }^\circ\text{C}$

Таблица 1

Составы невариантных и промежуточных точек в системе  $\text{KNO}_3\text{--K}_2\text{SO}_4\text{--KCl--H}_2\text{O}$  при  $25\text{ }^\circ\text{C}$

Точка	Состав жидкой фазы, % масс.				Твердая фаза
	$\text{KNO}_3$	$\text{K}_2\text{SO}_4$	$\text{KCl}$	$\text{H}_2\text{O}$	
$e_3$	0,00	1,07	25,95	72,98	$\text{K}_2\text{SO}_4 + \text{KCl}$
$T_1$	12,88	2,56	12,76	71,79	
$e_2$	25,36	4,01	0,00	70,64	$\text{KNO}_3 + \text{K}_2\text{SO}_4$
$T_2(E)$	13,83	1,20	17,63	67,34	
$e_1$	14,66	0,00	21,92	63,42	$\text{KNO}_3 + \text{KCl}$

Составы на границах невариантных областей установлены с помощью изогидрических разрезов [19, 20]. Планирование сечений для определения границ изогидрического разреза невариантной области в системе  $\text{KNO}_3\text{--K}_2\text{SO}_4\text{--KCl--H}_2\text{O}$  при 25 °С показано на рис. 2. Все составы исходных смесей компонентов в сечениях разреза готовили добавлением к раствору одной соли двух других солей. В сечениях  $L_{12}$  к раствору сульфата калия в воде добавляли соли:  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{KCl}$ . В сечении  $M_{12}$  использовали раствор нитрата калия, к которому добавляли соли  $\text{K}_2\text{SO}_4$  и  $\text{KCl}$ . Экспериментально полученные составы  $l_2$  и  $m_2$  располагаются на грани невариантной области  $\text{K}_2\text{SO}_4\text{--}T_2\text{--KNO}_3$ . Состав точки  $l_1$  располагается на грани  $\text{K}_2\text{SO}_4\text{--}T_2\text{--KCl}$ . Состав точки  $m_1$  находится на грани  $\text{KCl--}T_2\text{--KNO}_3$ . Состав эвтонического раствора ( $E_{\text{экс.}}$ ) вычислен по значениям коэффициентов на каждой грани (табл. 2) по формулам (3) и (4).

$$W = \frac{100}{(1+K_A+K_C+K_D)} \quad (3)$$

$$X = K_{A,C,D} \cdot W \quad (4)$$

где  $W$  – содержание воды в тройном невариантном растворе,  $K_A$  – отношение содержания нитрата калия к содержанию воды,  $K_D$  – отношение содержания сульфата калия к содержанию воды,  $K_C$  – отношение хлорида калия к содержанию воды,  $X$  – содержание солевого компонента в эвтоническом растворе,  $K_{A,C,D}$  – соответствующий коэффициент. Результат вычисления приведен в табл. 2. Как видно из таблицы, спрогнозированный состав ( $T_2$ ) отличается от экспериментального ( $E_{\text{ACD}}$ ) не более чем на 5% масс. по хлориду натрия и воде, и менее чем на 1% по нитрату и сульфату

калия. Прогноз такой точности позволяет значительно минимизировать экспериментальное исследование по времени и реактивам.

Таблица 2

**Составы точек на границах невариантной области изогидрического разреза системы  $\text{KNO}_3(\text{A})\text{--K}_2\text{SO}_4(\text{D})\text{--KCl}(\text{C})\text{--H}_2\text{O}$  при 25 °С и вычисленный состав эвтонического раствора ( $E_{\text{ACD}}$ )**

Точка	Состав жидкой фазы, % масс.				Соотношение компонентов		
	A	D	C	H <sub>2</sub> O	{C} {H <sub>2</sub> O}	{A} {H <sub>2</sub> O}	{D} {H <sub>2</sub> O}
$m_2$	14,0 1	19,1 4	16,8 1	50,0 4	0,336	0,006	0,234
$l_2$	29,2 3	4,00	16,7 3	50,0 4			
$m_1$	14,0 1	0,32	35,6 3	50,0 4	0,335	0,006	0,234
$l_1$	11,7 0	4,00	34,2 6	50,0 4			
Средние значения коэффициентов					0,335	0,006	0,234
Точка	Состав насыщенного раствора, % масс.				Твердая фаза(ы);		
	A	D	C	H <sub>2</sub> O	(4).		
$T_2$	14,8 3	1,20	17,6 3	67,3 4	A + B + C		
$E_{\text{ACD}}$	14,8 3	0,41	21,3 1	63,4 5	То же		

В системе  $\text{KH}_2\text{PO}_4(\text{B})\text{--K}_2\text{SO}_4(\text{D})\text{--KCl}(\text{C})\text{--H}_2\text{O}$  по составам эвтонических растворов ограничивающих систем (формулы 1 и 2) вычислен предполагаемый состав трехкратно насыщенного раствора ( $E_{\text{BCD}}^*$ , табл. 3) и рассчитаны два изогидрических разреза с содержанием воды 55,0 и 65,0 % масс. Исследованы шесть сечений и получены по два состава на каждой границе невариантной области. По формулам (3), (4) вычислен состав эвтонического раство-

ра, насыщенный дигидрофосфатом калия, сульфатом калия и хлоридом калия ( $E_{BCD}$ , табл. 3).

В системе  $KNO_3(A)-KH_2PO_4(B)-K_2SO_4(D)-H_2O$  по формулам (1) и (2) рассчитан предполагаемый состав трехкратно насыщенного раствора ( $E_{ABD}^*$ , табл. 3). Изучены два изогидрических разреза с содержанием воды 52,0 и 57,0 % масс. и установлено два состава на каждой грани невариантной области системы. По формулам (3) и (4) вычислен состав эвтонического раствора, насыщенный дигидрофосфа-

том калия, сульфатом калия и нитратом калия ( $E_{ABD}$ , табл. 3).

Исходными данными для расчета предполагаемого состава эвтонического раствора ( $E_{ABCD}$ ) в пятикомпонентной системе  $KNO_3(A)-KH_2PO_4(B)-KCl(C)-K_2SO_4(D)-H_2O$  являются эвтоники ограничивающих ее четырехкомпонентных систем (табл. 3). Последовательным вычислением ряда промежуточных точек ( $T_i$ ) находим точку  $T_3$ , которая и является предполагаемым составом четырехкратно насыщенного раствора  $E_{ABCD}$ .

Таблица 3

**Составы невариантных и промежуточных точек в системе  $KNO_3(A)-KH_2PO_4(B)-KCl(C)-K_2SO_4(D)-H_2O$  при 25 °С**

Точка	Состав насыщенного раствора, % масс.					Твердая фаза
	$KNO_3(A)$	$KH_2PO_4(B)$	$KCl(C)$	$K_2SO_4(D)$	$H_2O$	
$E_{BCD}(E_{BCD}^*)$	–	3,12(5,72)	24,10(19,17)	0,58(1,62)	72,20(73,49)	B+C+D
$T_1$	10,67	5,83	11,65	2,08	69,78	
$E_{ABD}(E_{ABD}^*)$	20,64(17,63)	8,37(8,73)	–	3,48(2,36)	67,51(71,29)	A+B+D
$T_2$	12,85	2,78	16,71	1,21	66,46	
$E_{ACD}(E_{ACD}^*)$	14,83(14,83)	–	21,31(17,63)	0,41(1,20)	63,45(67,34)	A+C+D
$T_3 (E_{ABCD})$	13,31	2,47	18,99	0,59	64,64	A+B+C+D
$E_{ABC}[15]$	13,75	2,18	21,16	–	62,91	A+B+C

Границы невариантной области определяют структуру фазовых областей системы, число и характер взаимодействия всех твердых фаз, образующихся в системе. На основании вычисленного состава эвтонического раствора ( $T_3$ ) рассчитана структура фазовых областей системы  $KNO_3(A)-KH_2PO_4(B)-KCl(C)-K_2SO_4(D)-H_2O$  при 25 °С. В пятикомпонентной системе границами невариантной области являются гиперплоскости, задаваемые точками составов эвтонического раствора  $E$  и безводных солевых компонентов. На рис. 3 представ-

лена проекция пятикомпонентной системы в виде произвольной фигуры на плоскости. Изображение системы в виде произвольной проекции позволяет увидеть «дерево» линий моновариантных равновесий, образующих контуры поверхностей начала кристаллизации одной, двух, трех и четырех солей. В системе  $KNO_3(A) - KH_2PO_4(B) - KCl(C) - K_2SO_4(D) - H_2O$  при 25 °С наибольший объем кристаллизации наблюдается у сульфата калия, наименьший – у хлорида калия.

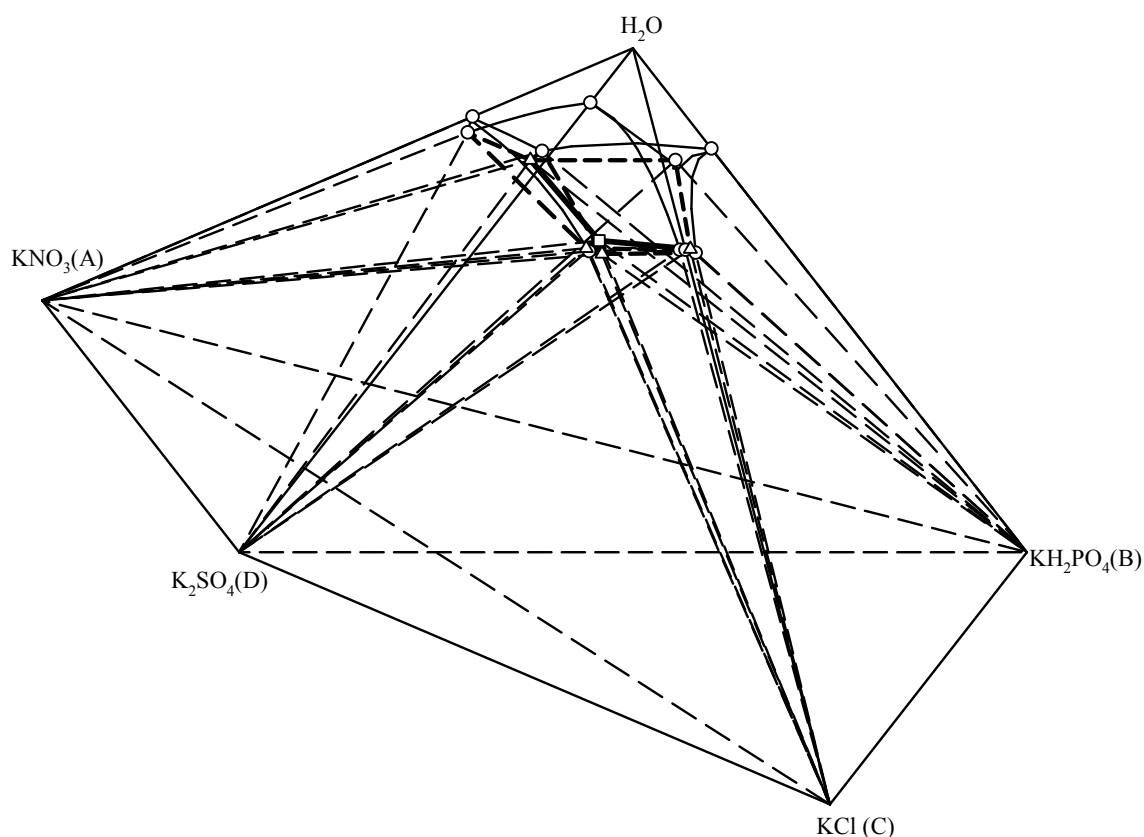


Рис. 3. Объемы кристаллизации индивидуальных солей в системе  $\text{KNO}_3(\text{A})\text{--KH}_2\text{PO}_4(\text{B})\text{--KCl}(\text{C})\text{--K}_2\text{SO}_4(\text{D})\text{--H}_2\text{O}$  при 25 °С

В таблице 4 приведены составы эвтонических растворов в водно-солевой системе, образованной нитратом калия, дигидрофосфатом калия, хлоридом калия и сульфатом калия. Состав с максимальным содержанием питательных веществ и минимальным содержанием воды соответствует эвтоническому раствору системы  $\text{KNO}_3\text{--KH}_2\text{PO}_4\text{--KCl--H}_2\text{O}$ . В составе  $E_{\text{ACD}}$ ,  $e_{\text{AC}}$ , при сумме питательных веществ равной 23, нет фосфора. Наибольший интерес представляет состав раствора, насыщенного всеми солями  $E_{\text{ABCD}}$ , содержащий серу в качестве микроэлемента.

### Выводы

Оптимизированным методом сечений установлены составы фаз, участвующих в невариантных равновесиях, в ограняющих четырехкомпонентных системах  $\text{KNO}_3\text{--KH}_2\text{PO}_4\text{--K}_2\text{SO}_4\text{--H}_2\text{O}$ ,  $\text{KH}_2\text{PO}_4\text{--KCl--K}_2\text{SO}_4\text{--H}_2\text{O}$  и  $\text{KNO}_3\text{--KCl--K}_2\text{SO}_4\text{--H}_2\text{O}$  при 25 °С. На основании полученных экспериментальных данных построена фазовая диаграмма пятикомпонентной системы. На диаграмме состояния системы  $\text{KNO}_3\text{--KH}_2\text{PO}_4\text{--KCl--K}_2\text{SO}_4\text{--H}_2\text{O}$  при 25 °С показаны линии моновариантного равновесия, выделены области кристаллизации индивидуальных солевых компонентов. Рассчитаны значения N,  $\text{P}_2\text{O}_5$  и  $\text{K}_2\text{O}$  в составах насыщенных растворов системы.

Таблица 4

**Величины N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и K<sub>2</sub>O в составах двух-, трех- и четырехкратно насыщенных растворов  
в системе KNO<sub>3</sub>(A)–KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>(B)–KCl(C)–K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(D)–H<sub>2</sub>O при 25 °C**

Точка	Состав, % масс.					NPK, % масс.			Сумма питательных веществ
	KNO <sub>3</sub>	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	KCl	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	
<i>E<sub>ABC</sub></i>	13,75	2,18	21,16	–	<b>62,91</b>	2	1	21	<b>24</b>
<i>E<sub>ACD</sub></i>	14,67	–	21,23	0,48	63,62	2	–	21	<b>23</b>
<i>E<sub>ABD</sub></i>	20,64	8,37	–	3,48	67,51	3	4	14	22
<i>E<sub>BCD</sub></i>	–	3,12	24,10	0,58	72,20	–	2	17	18
<i>E<sub>ABCD</sub>*</i>	13,31	2,47	18,99	0,59	<b>64,64</b>	2	1	19	<b>23</b>
<i>e<sub>AC</sub></i>	14,72	–	21,94	–	63,34	2	–	21	<b>23</b>
<i>e<sub>AB</sub></i>	21,73	9,53	–	–	68,73	3	5	13	21
<i>e<sub>BD</sub></i>	–	17,7	–	6,27	76,03	–	9	10	19
<i>e<sub>BC</sub></i>	–	3,58	24,66	–	71,75	–	2	17	19
<i>e<sub>AD</sub></i>	25,21	–	–	4,14	70,65	3	–	14	17
<i>e<sub>CD</sub></i>	–	–	25,95	1,07	72,98	–	–	17	17

\* – вычисленный состав

**Библиографический список**

1. *Минеев В.Г.* Агрохимия. М.: Колос, 2004. 720 с.
2. *Позин М.Е.* Технология минеральных солей (удобрений, пестицидов, промышленных солей, окислов и кислот). Л.: Химия, 1970. Ч. II. С. 384.
3. *Jancaitiene K., Slinksiene R.* Solid-liquid equilibrium in liquid compound fertilizers. Chem. Ind. Chem. Eng. Q. 2018. Vol. 24, № 1. P. 59–68.
4. *Кореньков Д.А.* Агрохимия азотных удобрений. М.: Наука, 1976. 222 с.
5. *Викторов М.М.* Графические расчеты в технологии неорганических веществ. Л.: Химия, 1972. 464 с.
6. *Аносов В.Я., Озерова М.И., Фиалков Ю.Я.* Основы физико-химического анализа. М.: Наука, 1976. 504 с.
7. *Мухеева В.И.* Метод физико-химического анализа в неорганическом синтезе. М.: Наука, 1975. 272 с.
8. *Способ* определения составов высококонцентрированных жидких комплексных удобрений: патент 2529163 Российская Федерация / Кистанова Н.С., Кудряшова О.С.,



- Мазунин С.А. и др.; – № 2013104530; заявл. 5.01.2013; опубл. 31.07.2014.
9. *Mazunin S.A., Noskov M.N., Elsuikov A.V.* Efficient methods to study phase equilibria in multinary aqueous systems // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2017. Vol. 62, № 5. P. 539–544.
10. *Кистанова Н.С., Чистина Ю.А.* Исследование фазовых равновесий в системе  $\text{KH}_2\text{PO}_4 - \text{KNO}_3 - \text{KCl} - \text{H}_2\text{O}$  при 25 °С // *Вестник Пермского университета. Серия: Химия.* 2018. Т. 8, вып. 3. С. 286–291.
11. *Кистанова Н.С., Белослудцева А.И.* Исследование моновариантного равновесия в системе  $\text{KH}_2\text{PO}_4 - \text{KNO}_3 - \text{KCl} - \text{H}_2\text{O}$  при 25° С // *Вестник Пермского университета. Серия: Химия.* 2019. Т. 9, вып. 4. С. 331–336.
12. *Справочник по растворимости солевых систем: в 3 т. Т. 3, кн. 2. Тройные и многокомпонентные системы, образованные неорганическими веществами / под ред. В.В. Кафарова и др. Л.: Наука, 1969.*
13. *Кистанова Н.С., Коротких С.А.* Фазовые равновесия в системе  $\text{KH}_2\text{PO}_4 - \text{K}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  при 25° С // *Изв. Саратов. Ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология.* 2017. Т. 17, вып. 4. С. 389–393.
14. *Шабанов Р.А., Хазеев А.В., Кистанова Н.С.* Исследование фазовых равновесий в системе  $\text{KH}_2\text{PO}_4 - \text{KNO}_3 - \text{H}_2\text{O}$  при 25°С // *Вестник Пермского университета. Серия: Химия.* 2016. Т. 23, вып. 3. С. 77–84.
15. *Журавлев Е.Ф., Шевелева А.Д.* Изучение растворимости в водно-солевых системах графоаналитическим методом сечений // *ЖНХ.* 1960. Т. 5, вып. 11. С. 2630–2637.
16. *Кудряшова О.С., Мазунин С.А.* Пермская школа профессора Р.В. Мерцлина // *Вестник Пермского университета. Серия: Химия.* 2016. Т. 22, вып. 2. С. 17–40.
17. *Мазунин С.А., Носков М.Н., Елсуиков А.В.* Эффективные способы исследования фазовых равновесий в многокомпонентных системах // *ЖНХ.* 2017. Т. 62, вып. 5. С. 538–544.
18. *Кистанова Н.С., Мазунин С.А., Фролова С.И.* Оптимизация исследования многокомпонентных водно-солевых систем методом сечений // *Наука и инновации XXI века : материалы VII окружной конф. молодых ученых, 23–24 нояб. 2006 г. В 2 т. Сургут: Изд-во СурГУ, 2007. Т.1 С. 110–112. ISBN 5-89545-231-07.*
19. *Воскобойников Н.Б.* Метод изучения четверных взаимных водно-солевых систем // *ЖНХ.* 1982. Т. 27, вып. 10. С. 2634–2640.
20. *Елсуиков А.В., Мазунин С.А.* Изогидрические разрезы водно-солевых систем для решения различных задач // *ЖНХ.* 2017. Т. 62, вып. 5. С. 545–550.

#### References

1. *Mineev V.G.* (2004), *Agrokhimiiia*. [Agrochemistry], Moscow, SU. (In Russ.)
2. *Позин М.Е.* (1970), *Tekhnologiiia mineralnykh solei*. [Technology of mineral salts], Chimia, Saint Petersburg. (In Russ.)
3. *Jancaitiene K. and Slinksiene, R.* (2018), "Solid-liquid equilibrium in liquid compound fertilizers", *Chem. Ind. Chem. Eng. Q.* Vol. 24, no. 1. pp. 59–68.
4. *Korenkov D.A.* (1976), *Agrokhimiiia azotnykh udobrenii*. [Agrochemistry of nitrogen fertilizers], Nauka, Moscow. (In Russ.)
5. *Viktorov M.M.* (1972), *Graficheskie raschety v tekhnologii neorganicheskikh veshchestv*.

- [Graphic computation in inorganic compound technology], *Chimia*. Saint Petersburg. (In Russ.).
6. Anosov V.Ia., Ozerova M.I., Fialkov Yu.Ia. (1976), *Osnovy fiziko-khimicheskogo analiza* [Basics of physicochemical analysis.] Nauka, Moscow. (In Russ.).
  7. Milheeva V.I. (1975), *Metod fiziko-khimicheskogo analiza v neorganicheskom sinteze*. [The method of physicochemical analysis in the inorganic synthesis]. Nauka, Moscow. (In Russ.).
  8. Kistanova N.S., Kudriashova O.S., Mazunin S.A., et al. (2014), *Sposob opredeleniia sostavov vysokokontsentririrovannykh zhidkikh kompleksnykh udobrenii*. [The method for determination the composition of highly concentrated liquid complex fertilizers], Russia, RU, Pat. 2529163.
  9. Mazunin S.A., Noskov M.N. and Elsukov A.V. (2017), "Efficient methods to study phase equilibria in multinary aqueous systems", *Russ. J. Inorg. Chem.* Vol. 62. no 5. pp. 539–544.
  10. Kistanova N.S., Chistina Iu.A. (2018), "The investigation of invariant phase equilibria for the system  $\text{KH}_2\text{PO}_4 - \text{KNO}_3 - \text{KCl} - \text{H}_2\text{O}$  at 25 °C", *Bulletin of Perm University. Series "Chemistry"*. no. 8 (3). pp. 286–291. (In Russ.).
  11. Kistanova N.S., Belosludceva A.I. (2019), "The investigation of invariant phase equilibria for the system  $\text{KH}_2\text{PO}_4 - \text{KNO}_3 - \text{KCl} - \text{H}_2\text{O}$  at 25 °C", *Bulletin of Perm University. Series "Chemistry"*. no. 9 (4). pp. 331–336. (In Russ.).
  12. Kogan V.B., Ogorodnikov C.K., Kapharov V.V. (1969), *Solubilities of Inorganic Compounds*, in Kapharov, V.V. (ed.), Vol. 3, no 2. Nauka, St.-Petersburg,
  13. Kistanova N.S., Korotkikh S.A. (2017), "Phase equilibrium for the system  $\text{KH}_2\text{PO}_4 - \text{K}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  at 25 °C", *Izv. Saratov Univ. (N.S.), Ser. Chemistry. Biology. Ecology*". Vol. 17. no. 4. pp. 389–393. (In Russ.).
  14. Shabanov R.A., Khazeev A.V., Kistanova N.S. (2016), "Phase diagram for the system  $\text{KH}_2\text{PO}_4 + \text{KNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$  at 25°C", *Bulletin of Perm University. Series "Chemistry"*. no. 23 (3). pp. 77–84. (In Russ.).
  15. Zhuravlev E.F., Sheveleva A.D. (1960), "The investigation water-salt systems by method of section", *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. Vol. 5. no. 11, pp. 2630–2637.
  16. Kudryashova O.S., Mazunin S.A. (2016), "Perm school of thought of R.V. Mertslin", *Bulletin of Perm University. Series "Chemistry"*. no. 22 (2). pp. 17–40. (In Russ.).
  17. Mazunin, S.A., Noskov, M.N., Elsukov, A.V. (2017), "Efficient methods of study phase equilibria in multinary aqueous systems", *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, Vol. 62, no 5, pp. 538–544.
  18. Kistanova N.S., Mazunin S.A., Frolova S.I. (2007), "Optimization of the multicomponent water-salt systems study by the method of sections", *PROC. 7th young scientists' Conf. "Science and Innovation"*, 23-24 November 2006, Surgut, pp. 110-112.
  19. Voskoboynikov, N.B. (1982), "The method of the quaternary reciprocal water-salts Systems investigation", *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, Vol. 27, no 10, pp. 2634–2640.
  20. Elsukov A.V., Mazunin S.A. (2017), "Izohydric sections of water-salt systems for solving various problems", *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, Vol. 62, no 5, pp. 545–550.

**Об авторах**

Белослудцева Анна Игоревна,  
выпускник  
Пермский государственный  
национальный исследовательский университет  
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15.

Шабанов Роман Андреевич,  
выпускник  
Пермский государственный  
национальный исследовательский университет  
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15.

Кистанова Наталья Сергеевна,  
кандидат химических наук, доцент кафедры не-  
органической химии, химической технологии и  
техносферной безопасности  
Пермский государственный  
национальный исследовательский университет  
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15.  
natalya.kistanova@gmail.com

Жаворонкова Мария Сергеевна,  
выпускник  
Пермский государственный  
национальный исследовательский университет  
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15.

**About the authors**

Belosludceva Anna Igorevna,  
graduate  
Perm State University  
15, Bukireva st., Perm, Russia, 614990

Shabanova Roman Andreevich,  
graduate  
Perm State University  
15, Bukireva st., Perm, Russia, 614990

Kistanova Natalya Sergeevna,  
Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor  
of the Department of Inorganic Chemistry, Chemical  
Technology and Safety Engineering  
Perm State University  
15, Bukireva st., Perm, Russia, 614990  
natalya.kistanova@gmail.com

Zhavoronkova Mariia Sergeevna,  
graduate  
Perm State University  
15, Bukireva st., Perm, Russia, 614990

**Информация для цитирования:**

*Белослудцева А.И., Шабанов Р.А., Кистанова Н.С., Жаворонкова М.С.* Определение фазовых равновесий и построение диаграммы системы  $\text{KH}_2\text{PO}_4 - \text{KNO}_3 - \text{KCl} - \text{K}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  при  $25^\circ\text{C}$  // Вестник Пермского университета. Серия «Химия». 2020. Т. 10, вып. 3. С. 246–256. DOI: 10.17072/2223-1838-2020-3-246-256.

Belosludtseva A.I., Shabanov R.A., Kistanova N.S., Zhavoronkova M.S. *Opredelenie fa-zovykh ravnovesii i postroenie diagrammy sistemy  $\text{KH}_2\text{PO}_4 - \text{KNO}_3 - \text{KCl} - \text{K}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  pri  $25^\circ\text{C}$*  [Study of phase equilibrium and construction of phase diagram for the system  $\text{KH}_2\text{PO}_4 - \text{KNO}_3 - \text{KCl} - \text{K}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  at  $25^\circ\text{C}$ ] // Vestnik Permskogo universiteta. Seriya «Khimiya» = Bulletin of Perm University. Chemistry. 2020. Vol. 10. Issue 2. P. 246–256 (in Russ.). DOI:10.17072/2223-1838-2020-3-246-256.