

УДК 549.6+73.123.6.

## **Механизм тетраэдризации сложных четырехкомпонентных систем**

### **The tetraedrization mechanism of complex four component system**

Оспанова А.С.<sup>1</sup>, Кокибасова Г.Т.<sup>2</sup>, Разбекова А.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Политехнический колледж Корпорации «Казахмыс», Балхаш;

<sup>2</sup>Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова (E-mail: kokibasova@mail.ru)

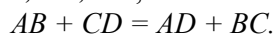
Төрт немесе одан да көп компонентті жүйелерде қосылыстар саны көбейген сайын жүйенің тетраэдризациясын Курнаков әдісі бойынша жүргізу қиын болғандықтан, бұл ережеге келесі қосымшаны ұсынып отырмыз: біріншілік тетраэдрлерді екіншіліктерге бөлу процесін тұрақты үшбұрыш жазықтығын альтернативті киюшы диагональ бойынша қарастыру. Осы механизмнің негізінде 165 қосылыстан тұратын CaO–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O жүйесінің тетраэдризациясы жүргізілген. Ұсынылған әдіс жүйенің тетраэдризациясын жеңілдетеді және осы жүйеде жүретін гидратация, дегидратация, конверсия, түзілу реакция механизмдерін қарастыруға мүмкіндік береді.

Tetraedrization of multicomponent systems basing on the Kurnakov methodology is being increased with the increasing number of compounds. So, we suggested the following addition to Kurnakov rule: the division process of the primary tetrahedron into the secondary ones has to be led through the singular secant, which alternately intersects the triangular surface. The given mechanism has been observed on the example of complex tetraedrization system CaO–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O consisting of 165 compounds. This method simplifies the process of tetraedrization and allows considering mechanisms of formation, dehydration, hydration and conversion of any system compounds.

Впервые вопрос о разбиении состава диаграмм на симплексы был рассмотрен Н.С.Курнаковым [1]. Симплексы принадлежат к простейшим группам химического пространства, которые не имеют диагоналей и диагональных плоскостей. Процесс деления треугольного симплекса тройной системы на вторичные треугольники, или триангуляция, зависит от числа и расположения секущих линий, подчиняющихся правилам Н.С.Курнакова [2]:

1. Двойные и тройные соединения располагаются в вершинах вторичных треугольников.
2. В точке пересечения сингулярных секущих должно находиться тройное соединение. Если тройное соединение не образуется, значит, одна из секущих является нестабильной.
3. Каждая сингулярная секущая в тройной системе характеризуется двойной эвтектикой, а каждая трехкомпонентная система — тройной эвтектикой. Если соединения секущей и первичной систем в жидком и твердом состояниях неограниченно растворяются друг в друге, тогда двойные и тройные эвтектические точки не образуются.
4. Сингулярные секущие проходят через полюса всех двойных и тройных соединений системы.

В четырехкомпонентных системах процесс деления первичного тетраэдра на вторичные, по Курнакову, происходит через двойные (тройные) соединения системы [1]. Например, в системе *A-B-C-D* (рис. 1) между двойными соединениями образуется квадрат, в вершинах которого расположены четыре солеобразующие вещества *AB*, *BC*, *AD*, *CD*, способные к реакциям взаимного обмена:



Направление реакции обмена зависит от положения секущих *AB-CD* и *AD-BC*, которые разделяют квадрат на два треугольника, образующих плоское древо обменного разложения. При увеличении числа двойных и появлении тройных, четверных соединений, соответственно, возрастает количество сингулярных секущих, следовательно, процесс тетраэдризации сильно усложняется.

В данной статье предлагается механизм проведения тетраэдризации сложных четверных систем не через две сингулярные секущие (рис. 1), а через сингулярную секущую, которая пересекает треугольную плоскость (рис. 2).

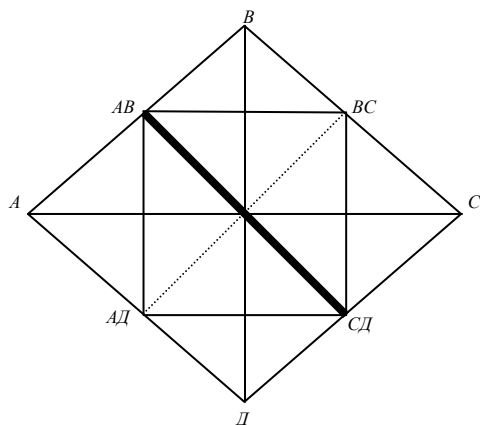


Рис. 1. Тетраэдризация, по Курнакову

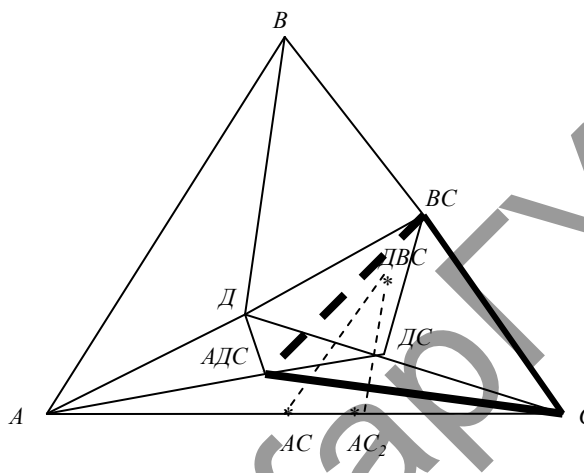
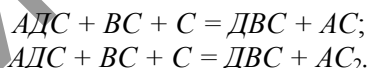


Рис. 2. Тетраэдризация через стабильную треугольную плоскость

Например, в системе  $A-B-C-D$ , где, кроме двухкомпонентных соединений, как  $AB$ ,  $BC$ ,  $AD$  и  $CD$ , имеются также трехкомпонентные соединения как  $ADC$ ,  $BCD$ , возможно образование вторичного тетраэдра  $ADC-DC-BC-C$ . Рассмотрим механизм образования данного тетраэдра (рис. 2). Для этого, по Курнакову, необходимо проверить стабильность секущей  $ADC-BC$ . Но если в системе более 100 соединений, где, помимо трехкомпонентных соединений, возможно существование также четырехкомпонентных соединений, то определить альтернативные секущие в пространстве очень трудно. Поэтому проще проверить стабильность треугольной плоскости  $ADC-BC-C$ , которую в данном случае альтернативно пересекают секущие  $DVC-AC$  и  $DVC-AC_2$ .

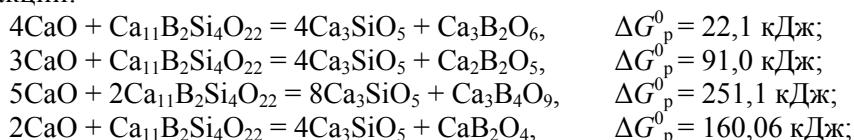
Устойчивость секущей или плоскости зависит от смещения равновесия, установившегося между ними. Для определения смещения равновесия составляется уравнение возможной взаимно-обменной реакции, левая часть которого состоит из трех компонентов плоскости, а правая часть — из двух компонентов секущей:

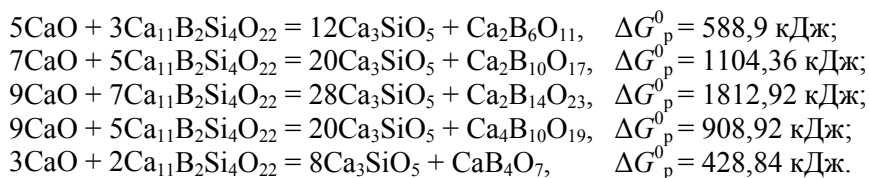


Смещение равновесия в реакции взаимного обмена рассчитывается по закону Гесса и по правилу Каблукова [3].

Таким образом, на основе рассмотренного механизма можно предложить следующее дополнение к правилу Курнакова: процесс деления первичного тетраэдра на вторичные следует вести через сингулярную секущую, которая альтернативно пересекает треугольную плоскость.

Предлагаемая методика была рассмотрена на примере сложной четырехкомпонентной системы  $CaO-B_2O_3-SiO_2-H_2O$  (рис. 3), состоящей из 165 соединений, из которых 4 являются четырехкомпонентными. Значения энергии Гиббса для данных соединений рассчитаны методом ионных инкрементов и представлены в таблице. Для проведения тетраэдризации системы  $CaO-B_2O_3-SiO_2-H_2O$  необходимо провести триангуляцию составляющих ее тройных систем. В систему входят 4 трехкомпонентные системы:  $CaO-B_2O_3-SiO_2$ ,  $CaO-B_2O_3-H_2O$ ,  $CaO-SiO_2-H_2O$ ,  $B_2O_3-SiO_2-H_2O$ . В качестве примера приведем триангуляцию системы  $CaO-B_2O_3-SiO_2$  (рис. 3, табл.). Проверим стабильность первой секущей 1–159. Для этого проведем альтернативные секущие 38–55, 38–50, 38–56, 38–47, 38–52, 38–53, 38–54, 38–58, 38–48, пересекающие секущую 1–159. Составим уравнения реакций:





Изменения энергии Гиббса реакций, рассчитанных по закону Гесса, показывают, что секущая 1–159 стабильна.

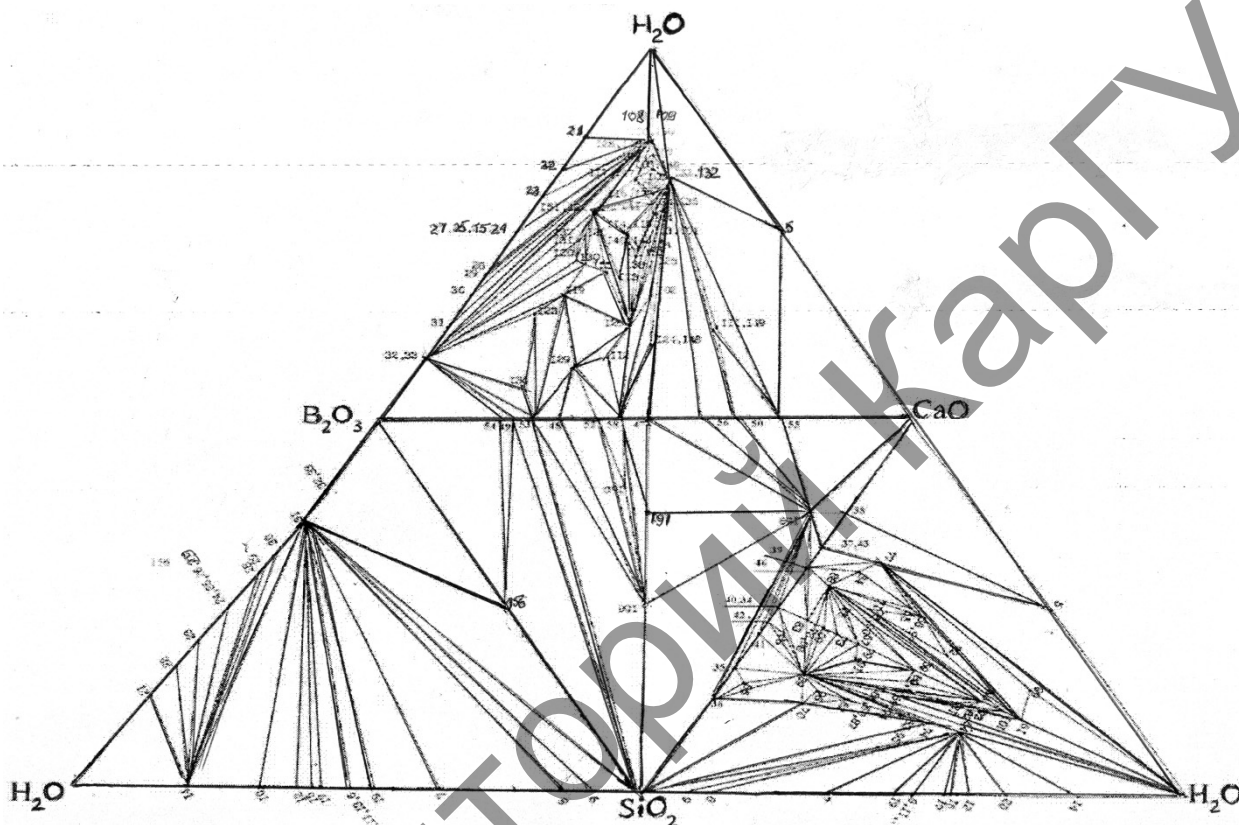


Рис. 3. Система CaO–B<sub>2</sub>O<sub>5</sub>–SiO<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O

Т а б л и ц а

Значения энергии Гиббса соединений системы CaO–B<sub>2</sub>O<sub>5</sub>–SiO<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O

№ п/п	Соединение	$-\Delta G_{298}^0$ , кДж/моль
1	CaO	603,5
2	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1193,8
3	SiO <sub>2</sub>	892,6
4	H <sub>2</sub> O	237,2
5	Ca(OH) <sub>2</sub>	897,5
6	H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	1084,6
7	H <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1945,1
8	H <sub>2</sub> Si <sub>8</sub> O <sub>17</sub>	7108,1
9	H <sub>2</sub> Si <sub>14</sub> O <sub>29</sub>	12271,2
10	H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>	1308,6
11	H <sub>4</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	2169,1
12	H <sub>6</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	2393,2
13	H <sub>6</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>9</sub>	3253,7
14	H <sub>8</sub> SiO <sub>6</sub>	1756,7
15	H <sub>8</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub>	3477,7
16	H <sub>8</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>12</sub>	4338,2

№ п/п	Соединение	$-\Delta G_{298}^0$ , кДж/моль
17	H <sub>10</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>13</sub>	4568,3
18	H <sub>10</sub> Si <sub>5</sub> O <sub>15</sub>	5422,8
19	H <sub>10</sub> Si <sub>6</sub> O <sub>17</sub>	6320,0
20	H <sub>12</sub> Si <sub>6</sub> O <sub>18</sub>	6507,4
21	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	937,6
22	H <sub>4</sub> B <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1667,4
23	H <sub>6</sub> B <sub>4</sub> O <sub>9</sub>	3127,0
24	HBO <sub>2</sub>	729,8
25	H <sub>2</sub> B <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1459,6
26	H <sub>3</sub> B <sub>3</sub> O <sub>6</sub>	2189,4
27	H <sub>4</sub> B <sub>4</sub> O <sub>8</sub>	2919,2
28	H <sub>4</sub> B <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	4131,2
29	H <sub>3</sub> B <sub>5</sub> O <sub>9</sub>	3401,4
30	H <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	2671,6
31	H <sub>4</sub> B <sub>12</sub> O <sub>20</sub>	7636,4
32	HB <sub>5</sub> O <sub>8</sub>	3167,6

№ п/п	Соединение	$-\Delta G_{298}^0$ , кДж/моль
33	$H_4B_{20}O_{32}$	12670,4
34	$CaSiO_3$	1539,0
35	$CaSi_2O_5$	2431,5
36	$CaSi_3O_7$	3324,1
37	$Ca_2SiO_4$	2185,3
38	$Ca_3SiO_5$	2831,7
39	$Ca_3Si_2O_7$	3724,3
40	$Ca_3Si_3O_9$	4616,9
41	$Ca_3Si_4O_{11}$	5509,4
42	$Ca_5Si_6O_{17}$	8587,3
43	$Ca_6Si_3O_{12}$	6556,0
44	$Ca_6Si_4O_{14}$	7448,6
45	$Ca_6Si_6O_{18}$	9233,7
46	$Ca_8Si_5O_{18}$	9633,9
47	$CaB_2O_4$	1924,2
48	$CaB_4O_7$	3136,2
49	$CaB_6O_{10}$	4362,0
50	$Ca_2B_2O_5$	2596,7
51	$Ca_2B_4O_8$	3848,5
52	$Ca_2B_6O_{11}$	5060,5
53	$Ca_2B_{10}O_{17}$	7506,5
54	$Ca_2B_{14}O_{23}$	9759,5
55	$Ca_3B_2O_6$	3269,2
56	$Ca_3B_4O_9$	4520,9
57	$Ca_3B_6O_{12}$	5772,7
58	$Ca_4B_{10}O_{13}$	8908,9
59	$CaSiO_3 \cdot H_2O$	1786,3
60	$CaSiO_3 \cdot 2H_2O$	2033,6
61	$CaSiO_3 \cdot 3H_2O$	2280,9
62	$CaSi_2O_5 \cdot H_2O$	2678,8
63	$CaSi_2O_5 \cdot 2H_2O$	2926,1
64	$CaSi_2O_5 \cdot 3H_2O$	3173,4
65	$Ca_2SiO_4 \cdot H_2O$	2432,7
66	$Ca_2SiO_4 \cdot 1,17H_2O$	2474,7
67	$Ca_2Si_2O_6 \cdot H_2O$	3325,2
68	$Ca_2Si_3O_8 \cdot 2H_2O$	4465,1
69	$Ca_2Si_3O_8 \cdot 2,5H_2O$	4588,7
70	$Ca_2Si_5O_{12} \cdot 1,5H_2O$	6126,5
71	$Ca_3Si_2O_7 \cdot H_2O$	3971,8
72	$Ca_3Si_2O_6(OH)_2 \cdot 2H_2O$	4411,6
73	$Ca_3Si_3O_9 \cdot H_2O$	4864,2
74	$Ca_3Si_6O_{15} \cdot 7H_2O$	9025,6
75	$Ca_4Si_3O_{10} \cdot H_2O$	5510,6
76	$Ca_4Si_3O_{10} \cdot 1,5H_2O$	5634,2
77	$Ca_5Si_2O_9 \cdot H_2O$	5264,4
78	$Ca_5Si_3O_{15} \cdot H_2O$	7942,1
79	$Ca_5Si_6O_{17} \cdot 3H_2O$	9329,2
80	$Ca_5Si_6O_{17} \cdot 5,5H_2O$	9947,5
81	$Ca_5Si_6O_{17} \cdot 9H_2O$	10813,0
82	$Ca_5Si_6O_{17} \cdot 10H_2O$	11060,3
83	$Ca_6Si_6O_{18} \cdot H_2O$	9481,0
84	$Ca_6Si_3O_{12} \cdot H_2O$	6803,3
85	$Ca_7Si_{16}O_{39} \cdot H_2O$	19053,0
86	$Ca_8Si_{10}O_{28} \cdot H_2O$	14344,0
87	$Ca_8Si_{12}O_{28}(OH)_4 \cdot 6H_2O$	17696,5
88	$Ca_9Si_6O_{21} \cdot H_2O$	11420,2

№ п/п	Соединение	$-\Delta G_{298}^0$ , кДж/моль
89	$Ca_{14}Si_{24}O_{58}(OH)_8 \cdot 2H_2O$	32309,2
90	$Ca_8[Si_6O_{17}](OH)_6$	11268,4
91	$2\{Ca_{10}[Si_{12}O_{31}](OH)_6 \cdot 3H_2O\}$	18576,6
92	$Ca_{10}[Si_{12}O_{31}](OH)_6 \cdot 8H_2O$	19676,6
93	$Ca_{10}[Si_{12}O_{31}](OH)_6 \cdot 18H_2O$	21876,6
94	$Ca_4[Si_6O_{15}](OH)_6 \cdot 4H_2O$	9068,2
95	$3\{Ca_3[Si_6O_{13}](OH)_4 \cdot 4H_2O\}$	8669,1
96	$4\{Ca_3Si_6O_{13}(OH)_4\}$	7734,5
97	$Ca_{12}[Si_6O_{17}]_2(OH)_4 \cdot 12Ca(OH)_2$	29732,5
98	$CaSiO_3 \cdot 0,16H_2O$	1574,2
99	$Ca_2SiO_4 \cdot 4H_2O$	3065,3
100	$Ca_4Si_4O_{12} \cdot H_2O$	6375,8
101	$CaSiO_3 \cdot 2,5H_2O$	2089,0
102	$CaB_2O_4 \cdot H_2O$	2163,5
103	$CaB_2O_4 \cdot 2H_2O$	2402,9
104	$Ca[B_2O_2(OH)_4]$	2413,5
105	$CaB_2O_4 \cdot 4H_2O$	2881,5
106	$Ca[B(OH)_4]_2$	2902,8
107	$Ca[B_2O(OH)_6] \cdot 2H_2O$	3136,8
108	$Ca[B_2O(OH)_6] \cdot 3H_2O$	3376,1
109	$CaB_2O_4 \cdot 6H_2O$	3360,2
110	$Ca[B(OH)_4]_2 \cdot 2H_2O$	3381,5
111	$Ca_2B_2O_5 \cdot Ca[B_3O_4(OH)_3]$	2836,0
112	$Ca[B_3O_5(OH)]$	2652,6
113	$Ca[B_3O_4(OH)_3]$	2897,2
114	$Ca[B_3O_3(OH)_5]$	3151,9
115	$Ca[B_3O_4(OH)_3] \cdot H_2O$	3136,5
116	$Ca[B_3O_3(OH)_5] \cdot H_2O$	3381,2
117	$Ca[B_3O_3(OH)_5] \cdot 2H_2O$	3620,6
118	$Ca[B_3O_3(OH)_5] \cdot 4H_2O$	4099,2
119	$Ca[B_3O_4(OH)_2]_2$	4851,3
120	$CaB_6O_{10} \cdot 3H_2O$	5080,0
122	$CaB_6O_8(OH)_4 \cdot 3H_2O$	5569,3
123	$CaB_8O_{13} \cdot 2H_2O$	6060,9
124	$CaB_4O_8 \cdot H_2O$	4087,8
125	$Ca_2B_4O_7(OH)_2 \cdot 2H_2O$	4571,8
126	$Ca_2B_5O_8(OH)_3$	4821,5
127	$Ca_2B_6O_{11} \cdot 7H_2O$	6735,8
128	$Ca_2B_6O_{11} \cdot 13H_2O$	8171,8
129	$Ca_2B_8O_{13}(OH)_2$	6530,9
130	$Ca_2B_{10}O_{17} \cdot 5H_2O$	8703,1
131	$Ca_2B_{14}O_{23} \cdot 8H_2O$	11673,9
132	$Ca_3B_4(OH)_{18}$	6722,8
133	$Ca_3B_4O_9 \cdot 9H_2O$	6674,9
134	$Ca_3B_6O_6(OH)_{12} \cdot 2H_2O$	7719,3
135	$Ca_3B_6O_{12} \cdot 8H_2O$	7687,3
136	$Ca_3B_{18}O_{30} \cdot H_2O$	13058,7
137	$Ca_3B_{20}O_{33} \cdot 12H_2O$	16885,0
138	$Ca_4B_{10}O_{19} \cdot 7H_2O$	10584,2
139	$Ca_4B_{10}O_{19} \cdot 20H_2O$	13695,5
140	$2[Ca_2B_6O_{11} \cdot 5H_2O]$	12514,3
141	$Ca_3B_6O_6(OH)_{12} \cdot 2H_2O$	6746,4
142	$CaB_2O_4 \cdot 2,5H_2O$	2522,5
143	$Ca_2B_6O_{11} \cdot 5H_2O$	6257,1
145	$CaB_2O_4 \cdot 5H_2O$	3120,8
146	$Ca(H_2BO_3)_2 \cdot 2H_2O$	2892,2

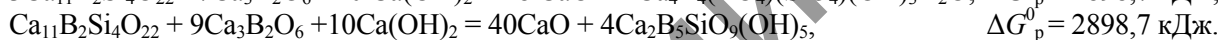
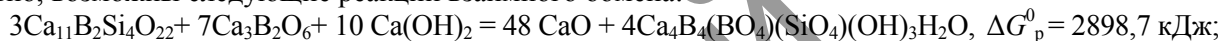
№ п/п	Соединение	$-\Delta G_{298}^0$ , кДж/моль
147	$\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	7214,5
148	$\text{Ca}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{OH})_2$	4093,1
149	$\text{CaHBO}_3$	1420,7
150	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{BO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	3370,9
151	$\text{CaB}_6\text{O}_7(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	5574,6
152	$\text{CaB}_2\text{O}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	2542,2
153	$\text{Ca}_6\text{B}_{14}\text{O}_{27} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	15124,8
154	$\text{Ca}_8\text{B}_{20}\text{O}_{38} \cdot 15\text{H}_2\text{O}$	21407,9
155	$\text{Ca}_5\text{B}_{18}\text{O}_{23} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	16645,2
156	$\text{B}_2\text{SiO}_5$	2054,31

№ п/п	Соединение	$-\Delta G_{298}^0$ , кДж/моль
157	$\text{B}_{100}\text{Si}_{50}\text{O}_{250}$	102715
158	$\text{CaB}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	3670,7
159	$\text{Ca}_{11}\text{B}_2\text{Si}_4\text{O}_{22}$	12204,1
160	$\text{Ca}_4\text{B}_{10}\text{Si}_2\text{O}_{23}$	10564,6
161	$\text{Ca}_3\text{B}_6\text{Si}_2\text{O}_{16}$	7478,6
162	$\text{Ca}_4\text{B}_4(\text{BO}_4)(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	9002,9
163	$\text{Ca}_4\text{BSi}_{17}\text{OH}$	8681,3
164	$\text{Ca}_2\text{B}_5\text{SiO}_9(\text{OH})_5$	5890,8
165	$\text{CaBSiO}_4(\text{OH})$	2262,7

Аналогичным способом происходит образование древ в четверных и высших системах. Соответствующие симплексы — треугольник, тетраэдр и другие разделяются посредством сингулярных секущих плоскостей, объемов на целое число вторичных симплексов.

Сочетание вторичных симплексов дает плоское дерево, или карту, химической диаграммы, которая представляет геометрическое изображение основных реакций соединения, вытеснения (замещения) или обменного разложения.

После триангуляции трехкомпонентных систем проводится тетраэдризация. В системе  $\text{CaO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  треугольной плоскости  $\text{Ca}_{11}\text{B}_2\text{Si}_4\text{O}_{22}-\text{Ca}_3\text{B}_2\text{O}_6-\text{Ca}(\text{OH})_2$  (159–55–5) альтернативной являются секущие  $\text{CaO}-\text{Ca}_4\text{B}_4(\text{BO}_4)(\text{SiO}_4)(\text{OH})_3\text{H}_2\text{O}$  (1–164) и  $\text{CaO}-\text{Ca}_2\text{B}_5\text{SiO}_9(\text{OH})_5$  (1–162). Следовательно, возможны следующие реакции взаимного обмена:



Значения энергии Гиббса показывают, что равновесие смещено в левую сторону в обеих реакциях, т.е. треугольная плоскость  $\text{Ca}_{11}\text{B}_2\text{Si}_4\text{O}_{22}-\text{Ca}_3\text{B}_2\text{O}_6-\text{Ca}(\text{OH})_2$  является стабильной.

Таким образом, тетраэдр  $\text{Ca}_{11}\text{B}_2\text{Si}_4\text{O}_{22}-\text{Ca}_3\text{B}_2\text{O}_6-\text{Ca}(\text{OH})_2-\text{CaO}$  является первым фазовым единичным блоком системы (рис. 4).

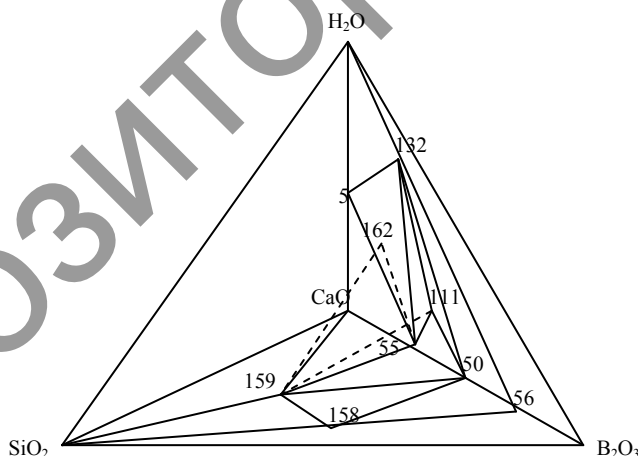
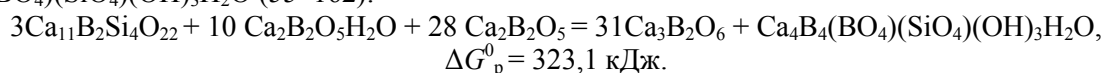


Рис. 4. Тетраэдризация системы  $\text{CaO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$

Аналогично можно проверить и другие треугольные плоскости. Для плоскости  $\text{Ca}_{11}\text{B}_2\text{Si}_4\text{O}_{22}-\text{Ca}_2\text{B}_2\text{O}_5\text{H}_2\text{O}-\text{Ca}_2\text{B}_2\text{O}_5$  (159–111–50) альтернативной является секущая  $\text{Ca}_3\text{B}_2\text{O}_6-\text{Ca}_4\text{B}_4(\text{BO}_4)(\text{SiO}_4)(\text{OH})_3\text{H}_2\text{O}$  (55–162):



Термохимический анализ показателей реакций указывает на стабильность плоскости 159–111–50.

Следовательно, вторым фазовым единичным блоком системы является тетраэдр  $\text{Ca}_{11}\text{B}_2\text{Si}_4\text{O}_{22}-\text{Ca}_2\text{B}_2\text{O}_5\text{H}_2\text{O}-\text{Ca}_2\text{B}_2\text{O}_5-\text{Ca}_3\text{B}_2\text{O}_6$  (159–111–50–55) (рис. 4).

Плоскость 47–162–164 альтернативно пересекается секущей (132–161):  
 $13\text{CaB}_2\text{O}_4 + 7\text{Ca}_4\text{B}_4(\text{BO}_4)(\text{SiO}_4)(\text{OH})_3\text{H}_2\text{O} + 11\text{Ca}_2\text{B}_5\text{SiO}_9(\text{OH})_5 = 5\text{Ca}_3\text{B}_4(\text{OH})_{18} + 16\text{Ca}_3\text{B}_6\text{Si}_2\text{O}_{16}$ ,  
 $\Delta G_p^0 = -437,9 \text{ кДж}$ .

Значение энергии Гиббса показывает, что химическое равновесие реакции смещено вправо, следовательно, плоскость 47–62–164 нестабильна.

Аналогично были определены все стабильные плоскости системы. Стабильные треугольные плоскости, образованные при тетраэдризации, делят четырехкомпонентную систему на простые тетраэдры. В системе  $\text{CaO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  при тетраэдризации получены следующие простые тетраэдры:

$\text{Ca}_{11}\text{B}_2\text{Si}_4\text{O}_{22}-\text{Ca}_3\text{B}_2\text{O}_6-\text{Ca}(\text{OH})_2-\text{CaO}$	(159–55–5–1);
$\text{CaO}-\text{Ca}_{11}\text{B}_2\text{Si}_4\text{O}_{22}-\text{Ca}_3\text{SiO}_5-\text{Ca}(\text{OH})_2$	(5–159–55–132);
$\text{Ca}_{11}\text{B}_2\text{Si}_4\text{O}_{22}-\text{Ca}_3\text{B}_2\text{O}_6-\text{Ca}_3\text{B}_4(\text{OH})_{18}-\text{Ca}_2\text{B}_2\text{O}_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$	(159–55–132–111);
$\text{Ca}_{11}\text{B}_2\text{Si}_4\text{O}_{22}-\text{Ca}_2\text{B}_2\text{O}_5-\text{Ca}_3\text{B}_4(\text{OH})_{18}-\text{Ca}_2\text{B}_2\text{O}_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$	(159–50–132–111);
$\text{Ca}_{11}\text{B}_2\text{Si}_4\text{O}_{22}-\text{Ca}_2\text{B}_2\text{O}_5-\text{Ca}_3\text{B}_4\text{O}_9-\text{Ca}_3\text{B}_4(\text{OH})_{18}$	(159–50–56–132);
$\text{Ca}_{11}\text{B}_2\text{Si}_4\text{O}_{22}-\text{Ca}_3\text{B}_4(\text{OH})_{18}-\text{Ca}_3\text{B}_4\text{O}_9-\text{CaB}_2\text{O}_4$	(159–132–56–47);
$\text{Ca}_{11}\text{B}_2\text{Si}_4\text{O}_{22}-\text{Ca}_4\text{B}_4(\text{BO}_4)(\text{SiO}_4)(\text{OH})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}-\text{Ca}_3\text{B}_4(\text{OH})_{18}-\text{CaB}_2\text{O}_4$	(159–162–132–47);
$\text{Ca}_{11}\text{B}_2\text{Si}_4\text{O}_{22}-\text{Ca}_4\text{B}_4(\text{BO}_4)(\text{SiO}_4)(\text{OH})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}-\text{CaB}_2\text{O}_4-\text{Ca}_3\text{B}_6\text{Si}_2\text{O}_{16}$	(159–162–47–161);
$\text{Ca}_4\text{B}_4(\text{BO}_4)(\text{SiO}_4)(\text{OH})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}-\text{Ca}_3\text{B}_4(\text{OH})_{18}-\text{CaB}_2\text{O}_4-\text{Ca}_3\text{B}_6\text{Si}_2\text{O}_{16}$	(162–132–47–161);
$\text{CaB}_2\text{Si}_2\text{O}_8-\text{Ca}_3\text{B}_4(\text{OH})_{18}-\text{Ca}_3\text{B}_6\text{Si}_2\text{O}_{16}-\text{Ca}_4\text{B}_4(\text{BO}_4)(\text{SiO}_4)(\text{OH})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	(158–132–161–162);
$\text{CaB}_2\text{Si}_2\text{O}_8-\text{Ca}_3\text{B}_6\text{Si}_2\text{O}_{16}-\text{Ca}_{11}\text{B}_2\text{Si}_4\text{O}_{22}-\text{Ca}_4\text{B}_4(\text{BO}_4)(\text{SiO}_4)(\text{OH})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	(158–161–159–162);
$\text{CaB}_2\text{Si}_2\text{O}_8-\text{Ca}_{11}\text{B}_2\text{Si}_4\text{O}_{22}-\text{Ca}_4\text{B}_4(\text{BO}_4)(\text{SiO}_4)(\text{OH})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}-\text{Ca}_3\text{B}_4(\text{OH})_{18}$	(158–159–162–132);
$\text{CaB}_2\text{Si}_2\text{O}_8-\text{Ca}_{11}\text{B}_2\text{Si}_4\text{O}_{22}-\text{CaBSiO}_4\text{OH}-\text{Ca}_3\text{B}_4(\text{OH})_{18}$	(158–159–165–132);
$\text{CaB}_2\text{Si}_2\text{O}_8-\text{Ca}_{11}\text{B}_2\text{Si}_4\text{O}_{22}-\text{CaBSiO}_4\text{OH}-\text{Ca}_{14}\text{Si}_{24}\text{O}_{58}(\text{OH})_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	(158–159–165–89);
$\text{Ca}_{11}\text{B}_2\text{Si}_4\text{O}_{22}-\text{CaBSiO}_4\text{OH}-\text{Ca}_3\text{B}_4(\text{OH})_{18}-\text{Ca}_{14}\text{Si}_{24}\text{O}_{58}(\text{OH})_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	(159–165–132–89);
$\text{CaB}_2\text{Si}_2\text{O}_8-\text{CaBSiO}_4\text{OH}-\text{Ca}_3\text{B}_4(\text{OH})_{18}-\text{Ca}_{14}\text{Si}_{24}\text{O}_{58}(\text{OH})_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	(158–165–132–89) и т.д.

Предложенная методика упрощает проведение тетраэдризации и позволяет рассматривать механизмы образования, дегидратации, гидратации, конверсии любого соединения системы.

#### References

1. *Kurnakov N.S.* Selected Works. — М.: AN USSR Izdat., 1960. — Vol. 1. — P. 525.
2. *Posypaiko V.I.* Methods of investigation of multicomponent salt systems. — М.: Nauka, 1978. — P. 255.
3. *Aldabergenov M.K., Trunin A.S., Balakaeva G.T.* Algorithm for describing the chemical transformations in the system  $\text{K}_2\text{O}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{H}_2\text{O}$  // The Inorganic chemistry Journal. — 1993. — Vol. 5. — № 5. — P. 885–886.